

虞庐松,王庚,王力,等.高寒环境温度下钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J].地震工程学报,2024,46(6):1251-1258.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230827001

YU Lusong, WANG Geng, WANG Li, et al. Experimental study on the seismic performance of concrete-filled steel tubular columns under ambient temperature in alpine regions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1251-1258. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230827001

高寒环境温度下钢管混凝土柱抗震性能试验研究

虞庐松¹, 王庚¹, 王力^{1,2}, 周晓夫³, 顾皓玮¹, 李子奇¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃公航旅建设集团有限公司, 甘肃 兰州 730099;

3. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 为探究高寒地区环境温度对圆钢管混凝土柱抗震性能的影响,开展4种不同温度工况下钢管混凝土柱的拟静力试验研究,分析不同环境温度下各试件的破坏特征、承载力、滞回特性、刚度退化、延性及耗能能力,揭示环境温度变化对钢管混凝土柱抗震性能的影响规律。试验结果表明:不同环境温度下各试件滞回曲线均呈梭形,未产生明显捏缩现象;试件典型破坏模式在不同温度下基本一致,均为钢管底部产生一圈贯通鼓曲波、核心混凝土被压溃、钢管撕裂,温度越低,钢管混凝土柱越早发生破坏,且破坏程度越严重;相较于常温(20℃)工况,0℃、-20℃、-40℃温度工况下,试验钢管混凝土柱水平承载力分别提高3.08%、6.15%、10.08%,初始刚度分别提高16.9%、30.3%、50.0%,而延性系数分别降低8.6%、14.6%、16.9%;环境温度越低,刚度退化速率也越大。温度变化对钢管混凝土柱抗震性能影响显著,高寒地区钢管混凝土结构抗震设计时需考虑环境低温对结构带来的不利影响。

关键词: 圆钢管混凝土柱; 拟静力试验; 抗震性能; 温度

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1251-08

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230827001

Experimental study on the seismic performance of concrete-filled steel tubular columns under ambient temperature in alpine regions

YU Lusong¹, WANG Geng¹, WANG Li^{1,2}, ZHOU Xiaofu³, GU Haowei¹, LI Ziqi¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. GHATG Construction Group, Lanzhou 730099, Gansu, China;

3. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, Sichuan, China)

Abstract: To investigate the impact of environmental temperature in alpine regions on the seismic performance of circular concrete-filled steel tubular (CFST) columns, a series of quasi-static tests

收稿日期: 2023-08-27

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005); 甘肃省教育厅青年博士支持项目(2023QB-045); 兰州交通大学甘肃省重点实验室开放课题(2022055); 甘肃省教育厅研究生创新之星项目(2023CXZX-596)

第一作者简介: 虞庐松(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁抗震研究。E-mail: yululong@mail.lzjtu.cn.

通信作者: 王力(1993-), 男, 博士, 副教授, 主要从事寒区桥梁抗震研究。E-mail: wangli1993@mail.lzjtu.cn.

were conducted on circular CFST columns at four different temperature conditions. The failure characteristics, bearing capacity, hysteresis characteristics, stiffness degradation, ductility, and energy-dissipation capacity of each specimen were analyzed, and the influence of temperature on the seismic performance of CFST columns was revealed. The experimental results showed that the hysteresis curves of specimens under different temperature conditions all present a spindle shape without obvious pinching phenomenon. The typical failure modes of specimens are basically the same at different temperatures: a circle of bulging waves occurs at the bottom of the steel pipe, the core concrete is crushed, and the steel pipe is torn. The lower the temperature, the earlier and more severe the failure of CFST columns. Compared with the working condition at a normal temperature (20 °C), the horizontal bearing capacities of CFST columns at 0 °C, -20 °C, and -40 °C are increased by 3.08%, 6.15%, and 10.08%, and the initial stiffness are increased by 16.9%, 30.3%, and 50.0%, respectively, whereas the ductility coefficients are decreased by 8.6%, 14.6%, and 16.9%, respectively. The lower the environmental temperature, the faster the rate of stiffness degradation. Temperature change has a significant impact on the seismic performance of CFST columns, so the adverse effects of low environmental temperatures on the structure should be considered in the seismic design of CFST structures in alpine regions.

Keywords: circular concrete-filled steel tubular column; pseudo-static test; seismic performance; temperature

0 引言

钢管混凝土 (Concrete Filled Steel Tube, CFST)是由钢管与核心混凝土形成的一种组合材料。钢管为核心混凝土提供围压应力,使其处于三向受压状态,核心混凝土则为钢管起到支撑作用,延缓钢管发生局部屈曲,因而钢管混凝土具有承载力高、抗震性能好等优点,目前已被广泛应用于高层建筑及大跨度桥梁结构中^[1-2]。

钢管混凝土柱作为一种组合结构,环境温度对其影响主要体现在两方面:一是温度对于钢材^[3-4]和混凝土^[5-6]材料力学性能的影响;二是由于混凝土与钢材两种材料的线膨胀系数与导热系数差异较大,容易在接触界面发生脱黏滑移、脱空等行为,减弱了钢管对于核心混凝土的约束效应,进而使整体的力学性能受到影响。国内外学者对于常温下钢管混凝土抗震性能已经开展了大量研究^[7-9],并产生出大量的研究成果^[10]。目前,在温度对钢管混凝土柱力学性能影响方面,靳忠强^[11]、陈宗平等^[12]分别对低温下和高温后钢管混凝土界面黏结强度进行了试验研究,得出了温度对界面黏结强度的影响规律。Yan等^[13-14]、虞庐松等^[15]对低温环境下钢管混凝土轴压性能进行了试验研究,讨论了温度对其竖向承载力、延性等力学性能的影响。Li等^[16]、曾翔^[17]对火灾作用后钢管混凝土滞回性能进行了试验研究;张童^[18]对腐蚀及冻融循环作用后钢管混凝土柱抗震

性能进行了数值分析。

近年来,随着西部大开发的不断推进,川藏铁路、兰新铁路等大型基础项目在我国西部高原地区进行建设,钢管混凝土因其良好的力学性能,被广泛应用于这些区域的铁路桥梁及站房中。这些地区具有温度低、温差大等特点,最低气温可达-60 °C。钢管混凝土结构在高寒高烈度区建设与运营阶段易受极端温度、地震等不利因素影响,研究表明极端温度对桥梁结构地震响应影响显著^[19-21]。目前关于高寒环境温度下钢管混凝土结构抗震性能的试验研究报道较少。

本文拟在上述研究基础上,开展-40~20 °C环境温度下钢管混凝土柱拟静力试验研究,探究环境温度对钢管混凝土柱水平承载力、耗能能力、刚度退化、延性等力学性能的影响规律与作用机理,为高寒地区钢管混凝土结构抗震设计提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

为对不同环境温度下钢管混凝土柱抗震性能进行研究,设计并制作了4个圆钢管混凝土柱,钢管直径 $D=140$ mm,钢管壁厚 $t=6$ mm,柱高 $L=1\ 200$ mm,实际加载高度 $h=1\ 000$ mm。在试验前进行了数值模拟,参照模拟结果与同类型常温试验结果,选取轴压比为0.4。各个试件的设计参数列于表1,试件构造见图1。

表 1 钢管混凝土试件信息

Table 1 Design parameters of CFST specimens

试件编号	T/°C	f_y /MPa	f_{cu} /MPa	n
CFST1	20	359.4	53.9	0.4
CFST2	0	378.2	60.3	0.4
CFST3	-20	394.3	65.6	0.4
CFST4	-40	416.5	74.7	0.4

注: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_y 为钢材屈服强度;n为轴压比

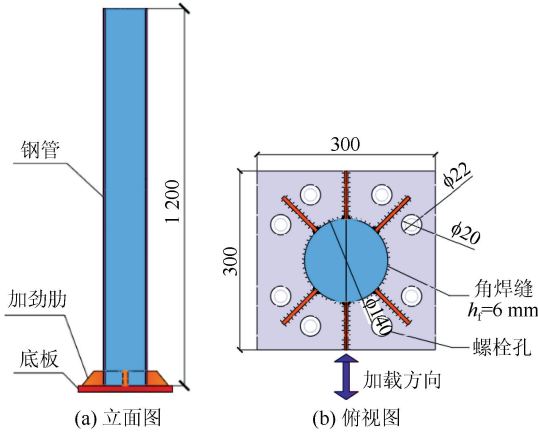


图 1 试件构造(单位:mm)

Fig.1 Specimen structure (Unit:mm)

1.2 材性试验

试验钢管采用有缝圆钢管,钢材牌号为 Q235,按照《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法(GB/T 228.1—2021)》^[22],对从钢管上截取的标准试件进行拉伸试验,试验结果列于表 1。混凝土采用 C50 自密实混凝土,由 PO42.5 普通硅酸盐水泥、粒径为 5~20 mm 连续级配碎石、砂、水,及 I 级粉煤灰等材料配制,具体配合比如表 2 所列。浇筑试件的同时浇筑 4 组标准立方体试块,与试件在同等条件下养护 28 d。低温试验时首先将试块放置在低温试验箱中降温,达到目标温度后恒温 48 h 取出^[23],依据《混凝土物理力学性能试验方法标准(GB/T 50081—2019)》^[24]进行试验,试验结果列于表 1。钢材与混凝土材性试验加载现场如图 2 所示。

1.3 试验装置与加载方案

本试验在兰州交通大学甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室完成,整个加载系统由水平向加载装置与竖向加载装置组成,如图 3 所示。采用电液伺服作动器施加低周往复荷载,钢管柱与作动器通

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of concrete

水胶比	各组分含量/(kg/m ³)						
	水泥	粉煤灰	5~10 mm 碎石	10~20 mm 碎石	砂	水	减水剂
0.33	353.8	176.9	345.3	517.9	810.6	175	6.1



图 2 试验加载图

Fig.2 Testing loading diagram

过加载头连接。为防止往复荷载作用下的松动滑移,两处螺栓连接处螺杆上均加有弹簧垫片。在反力梁与千斤顶之间放置两块四氟乙烯板,确保加载过程中千斤顶与钢管柱保持竖直。

正式加载前,首先施加轴向力至 50%设计压力值,若仪表运行正常,则逐渐加载至设计轴力值,并保持轴力恒定不变,然后施加水平往复荷载。整个加载过程由位移控制,在加载侧移率为±0.25%、±0.5%及±0.75%时,试件处于线弹性阶段,钢管表面没有明显现象,每级加载循环一圈;在加载侧移率为±1.0%~±4.0%之间时,每级加载循环三圈,

其中,侧移率在±1.0%~±2.0%之间时,加载位移步为 5 mm,侧移率在±2.0%~±4.0%之间时,加载位移步为 10 mm;加载侧移率在±5.0%及以后,每级加载循环两圈,加载位移步为 10 mm。加载制度如图 4 所示,当水平荷载下降至峰值荷载的 85%或当钢管发生断裂时停止加载,试验结束。

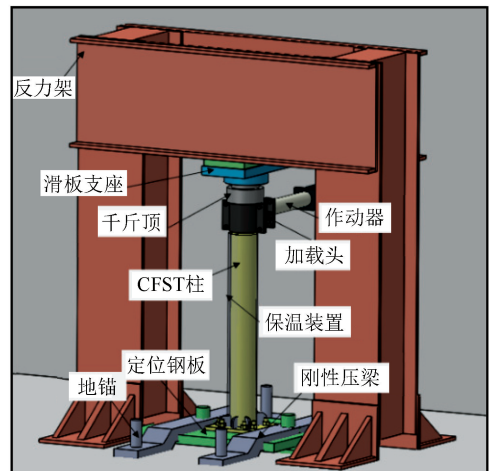


图 3 试验加载装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of test loading device

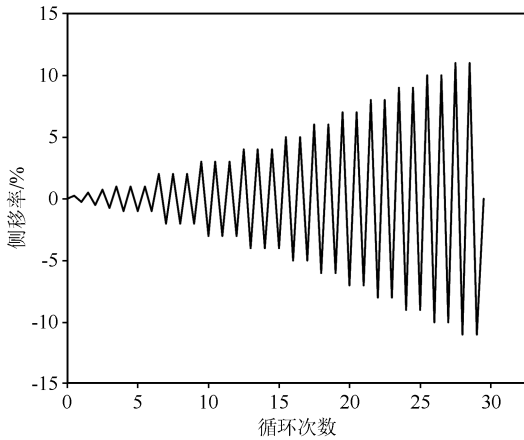


图4 加载制度

Fig.4 Testing loading system

1.4 温控装置

采用 PT100 温度传感器进行温度采集,在混凝土

(a) CFST2($T=0^{\circ}\text{C}$)(b) CFST3($T=-20^{\circ}\text{C}$)(c) CFST4($T=-40^{\circ}\text{C}$)

图5 试验加载图(低温工况)

Fig.5 Testing loading diagram (Low temperature condition)

(1) 弹性阶段:试件表面无明显现象,随着加载侧移率增大,温度越低,荷载增长越快。

(2) 弹塑性阶段:钢管外表面的油漆开始剥落,钢管外壁出现局部屈曲,屈曲位置位于加劲肋上方45~65 mm处;刚开始只能观察到钢管微微隆起,随着侧移增大,鼓曲逐渐由推拉方向加劲肋上方向两侧扩展;在钢管底部产生环形鼓曲波,在相同加载侧移率下,温度越低,鼓曲越为明显。

(3) 破坏阶段:钢管与混凝土均严重破坏,随着加载侧移率增大,水平荷载出现下降。20℃工况下,钢管在加载侧移率11.0%时断裂;温度越低,钢管越早出现断裂,-40℃与-20℃工况下,钢管均在侧移率为9.0%时断裂;0℃工况下,钢管在侧移率为10.0%时断裂。

在加载过程中,低温试件较常温试件早破坏,这是因为在低温环境下,核心混凝土强度提高,塑性降低,较早发生脆性破坏,导致钢管相比常温下较早出

土浇筑之前,利用固定架将温度传感器固定于钢管中心,确保试验时所测温度为混凝土中心温度。开展低温试验时,首先将试件放置在高精度低温冷柜中,待温度降至目标温度以下5℃时恒温48 h后取出。试验过程中外包3层保温棉,避免试验时温度散失过快。低温试验时间为3月初,室温在10℃以下,因此在试验过程中可以确保温度在目标温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内,低温工况试验加载如图5所示。

2 试验过程及现象

各试件在加载过程中均出现钢管外表面油漆剥落、钢管屈曲与撕裂、核心混凝土压碎与外流等试验现象。在试验加载过程中,每个试件均经历了弹性阶段、弹塑性阶段及破坏阶段。各阶段试验现象如图6所示。

现撕裂破坏。温度越低,钢管底部鼓曲长度越大,这说明温度越低,核心混凝土变形能力越差。试验结束后,切开外壁钢管发现内部混凝土出现严重的压溃现象,且温度越低,核心混凝土被压溃得越严重。沿着压溃部位往上,核心混凝土表面在往复荷载作用下产生大量微裂缝(图7)。

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

对试件进行不同温度工况下的拟静力试验,得到各试件滞回曲线,如图8所示。

由图8可知,加载初期,荷载与位移呈线性变化,滞回环狭长,耗能较小,没有出现明显的残余变形,随着加载次数的增加,滞回环逐渐变得饱满,耗能能力增强。不同温度工况下各试件的滞回环都呈梭形,形状较为饱满,未出现捏缩现象。水平荷载到达峰值点后,温度越低,试件的承载力下降越快,钢



(a) 弹性阶段



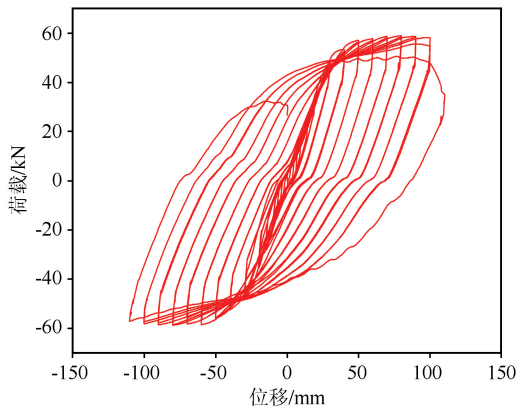
(I) 钢管轻微鼓曲(漆皮掉落) (II) 钢管鼓曲明显(漆皮严重掉落)
(b) 塑性阶段



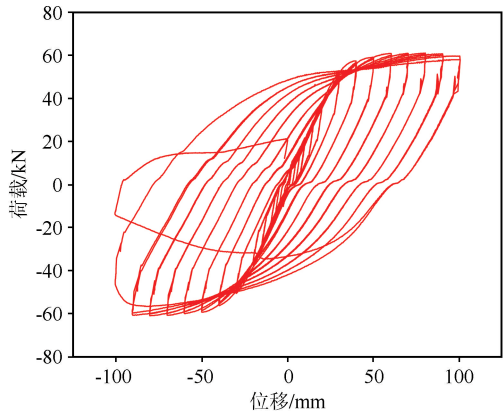
(I) 钢管开裂 (II) 钢管撕裂(混凝土外流)
(c) 破坏阶段

图 6 试验现象

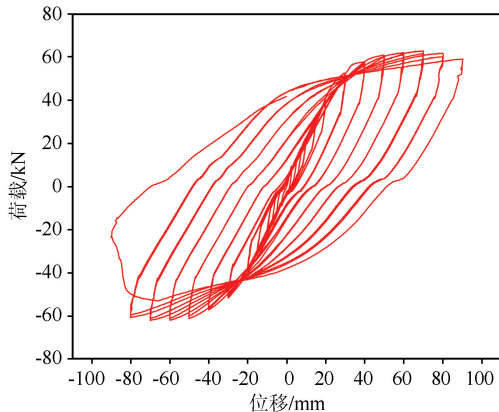
Fig.6 Testing phenomenon



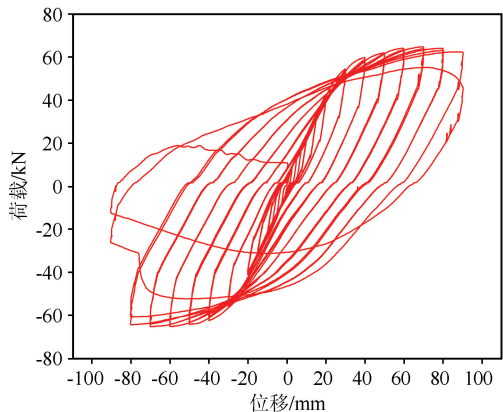
(a) CFST1($T=20^{\circ}\text{C}$)



(b) CFST2($T=0^{\circ}\text{C}$)



(c) CFST3($T=-20^{\circ}\text{C}$)



(d) CFST4($T=-40^{\circ}\text{C}$)

图 8 试件水平荷载-位移滞回曲线

Fig.8 Load-displacement hysteretic curves of specimens



图 7 核心混凝土破坏形态

Fig.7 Failure mode of core concrete

管越早断裂,试件越早丧失承载能力,也即温度越低,试件的延性越差。CFST2 与 CFST4 在最后一级加载的滞回曲线出现异形,这是因为在该级加载的第一个循环,钢管表面出现微裂缝,水平承载力出现下降,在第二个加载循环时钢管被彻底撕裂,核心混凝土外流,水平承载力出现突降。

3.2 骨架曲线

分析提取试验数据,得到各试件的骨架曲线如图 9 所示。

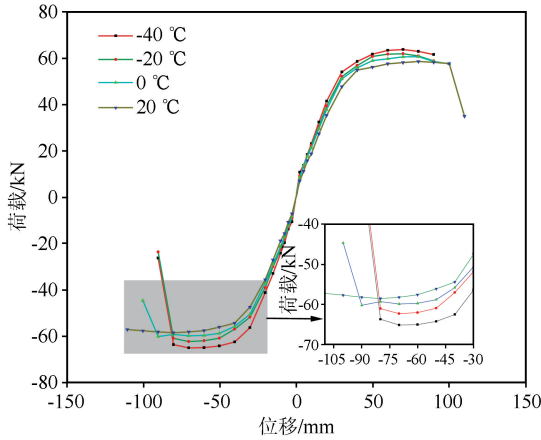


图9 试件骨架曲线

Fig.9 Skeleton curves of specimens

表3 试件峰值荷载

Table 3 Peak load of specimens

试件编号	CFST1	CFST2	CFST3	CFST4
峰值荷载/kN	58.5	60.3	62.1	64.4

由图9分析可知:不同温度工况下钢管混凝土

表4 试件的特征点

Table 4 Characteristic points of specimens

试件编号	屈服点		峰值点		极限点		μ	μ 变化率/%
	Δ_y /mm	P_y /kN	Δ_{max} /mm	P_{max} /kN	Δ_u /mm	P_u /kN		
CFST1	36.5	53.2	80.1	58.5	110.4	46.1	3.02	0
CFST2	35.6	53.6	80.5	60.3	98.3	51.1	2.76	-8.60
CFST3	35.0	54.4	70.1	62.1	90.3	41.3	2.58	-14.6
CFST4	34.3	57.2	70.1	64.4	86.1	49.2	2.51	-16.9

由表4可知,不同温度工况下试件延性系数均大于2。相比CFST1,CFST2、CFST3及CFST4延性系数分别降低了8.6%、14.6%及16.9%。究其原因主要是在低温工况下,钢材延性随着温度降低逐渐降低,混凝土在低温环境下强度提高,塑性降低,在压弯组合作用下较早产生破坏。

3.4 刚度退化

采用割线刚度 K 来表示刚度退化,其含义为第 i 次加载中正反方向水平力的绝对值之和与水平位移绝对值之和的比值。其计算表达式为:

$$K = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

各试件在不同温度下刚度退化曲线如图10所示。

由图10可知:各试件的初始刚度存在一定差异,相比常温试件(CFST1),低温工况试件(CFST2、CFST3、CFST4)初始刚度分别提高了16.9%、30.3%、50.0%,这是因为随着温度降低,混凝土弹性模量逐渐增大,因此低温工况下试件的初始刚度都有所提高。在加载侧移率2.0%之前,刚度

退化较为明显,且温度越低,刚度退化速率越大;加载侧移率2.0%以后,刚度退化速率逐渐变小,不同温度下的试件刚度退化轨迹基本一致。

3.3 延性指标

采用延性系数 μ 来反映试件的延性性能。位移延性系数计算公式为:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: Δ_y 屈服位移; Δ_u 为极限位移。

试件屈服点采用能量等值法计算,由于试件含钢率较高,没有明显的下降段,因此取钢管开裂时的位移作为极限位移 Δ_u 。试件位移延性系数列于表4,其中 P 与 Δ 取推拉方向平均值。

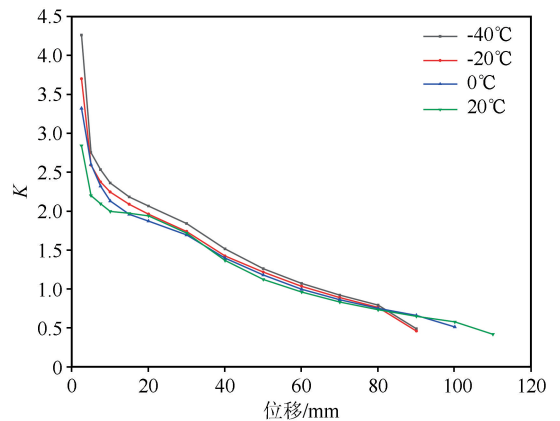


图10 刚度退化曲线对比

Fig.10 Comparison between stiffness degradation curves

3.5 耗能能力

通过滞回环面积来评价试件的耗能能力,选择每级加载的第一个循环来计算累计耗能,各试件累

计耗能如图 11 所示。

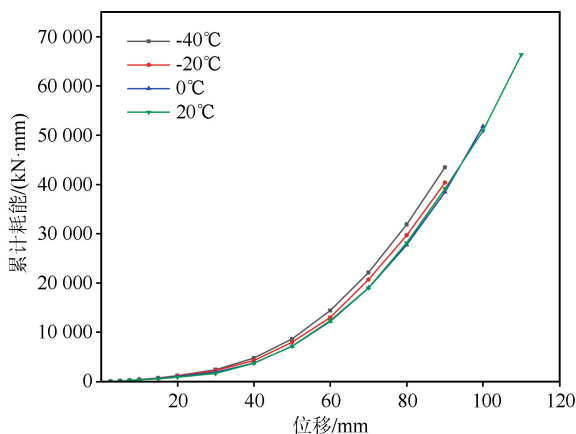


图 11 试件累计耗能能力对比

Fig.11 Comparison between accumulated energy dissipation capacities of specimens

由图 11 可知:在初始加载循环下,温度越低,水平荷载越大,滞回环面积越大,耗能越高。但由于温度越低,钢管越早断裂,因此低温工况下试件累计耗能低于常温工况下。相较于常温试件,0℃、-20℃及-40℃试件累计耗能分别降低 21.9%、39.2%及 34.5%。

4 结语

针对高原寒冷地区温差大、气温低等气候特点,围绕钢管与混凝土材料力学性能及界面黏结特性易受温度影响等核心问题,对 4 个不同温度工况下的钢管混凝土柱进行拟静力试验研究,结论如下:

(1) 不同温度工况下试件典型破坏模式基本一致,均为钢管底部产生一圈贯通的鼓曲波、核心混凝土被压溃、钢管撕裂,温度越低,钢管混凝土柱越早发生破坏,且破坏程度越严重。

(2) 各温度工况下滞回曲线均呈梭形,未产生明显捏缩现象,在相同加载位移下,低温试件耗能高于常温试件,但由于温度越低,试件越早断裂,低温试件累计耗能低于常温试件。

(3) 环境温度对试件承载力和延性有不同程度的影响,相较于常温(20℃)试件,温度为 0℃、-20℃及-40℃的试件水平承载力分别提高了 3.08%、6.15%及 10.08%,延性系数分别降低了 8.6%、14.6%及 16.9%,对抗震不利。

(4) 环境温度对试件初始刚度影响显著,相比常温(20℃)试件,温度为 0℃、-20℃及-40℃的试件初始刚度分别提高了 16.9%、30.3%及 50.0%;在加载过程中,温度越低,刚度退化速率越大。

参考文献(References)

- [1] 韩林海,牟廷敏,王法承,等.钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J].土木工程学报,2020,53(5):1-24.
HAN Linhai, MU Tingmin, WANG Facheng, et al. Design theory of CFST (Concrete-Filled Steel Tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 1-24.
- [2] 刘永健,孙立鹏,周绪红,等.钢管混凝土桥塔工程应用与研究进展[J].中国公路学报,2022,35(6):1-21.
LIU Yongjian, SUN Lipeng, ZHOU Xuhong, et al. Progress in the application of research on concrete-filled steel tubular bridge towers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(6): 1-21.
- [3] XIE J, XI R, TONG C L, et al. Mechanical properties of Q235-Q460 mild steels at low temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2023, 363: 129850.
- [4] 廖小伟,王元清,石永久,等.低温环境下桥梁钢 Q345qD 疲劳裂纹扩展行为研究[J].工程力学,2018,35(10):85-91.
LIAO Xiaowei, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, et al. Experimental study on the fatigue crack growth behavior of bridge steel Q345qD at low temperatures[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 85-91.
- [5] LIN H W, HAN Y F, LIANG S M, et al. Effects of low temperatures and cryogenic freeze-thaw cycles on concrete mechanical properties: a literature review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128287.
- [6] 谢剑,刘洋,严加宝,等.极地低温环境下混凝土断裂性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(增刊 1):341-350.
XIE Jian, LIU Yang, YAN Jiabao, et al. Experimental study on fracture behavior of concrete in polar low temperature environment[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Suppl01): 341-350.
- [7] YANG Z M, CHEN J, WANG F Y, et al. Seismic performance of circular concrete-filled steel tube columns reinforced with inner latticed steel angles[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 205: 107908.
- [8] LI W, JIANG H M, LI L F, et al. Seismic behavior of hybrid fiber cement-based composites encased CFST columns[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 74: 106625.
- [9] DONG H Y, QIN J, CAO W L, et al. Seismic behavior of circular CFST columns with different internal constructions[J]. Engineering Structures, 2022, 260: 114262.
- [10] 韩林海.钢管混凝土结构:理论与实践[M].3版.北京:科学出版社,2016.
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [11] 靳忠强.低温下矩形钢管混凝土界面粘结强度试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
JIN Zhongqiang. Experimental Study on interface bond strength of rectangular concrete filled steel tube at low temperature[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.

- [12] 陈宗平,刘祥,周文祥.高温后圆钢管高强混凝土界面黏结性能试验研究[J].工程力学,2018,35(8):192-200,256.
CHEN Zongping, LIU Xiang, ZHOU Wenxiang. Interface bond behavior between circle steel tube and high strength concrete after high temperatures[J].Engineering Mechanics, 2018,35(8):192-200,256.
- [13] YAN J B, WANG T, DONG X. Compressive behaviours of circular concrete-filled steel tubes exposed to low-temperature environment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118460.
- [14] YAN J B, DONG X, ZHU J S. Compressive behaviours of CFST stub columns at low temperatures relevant to the Arctic environment[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 503-519.
- [15] 虞庐松,刘彪,王力,等.高寒环境温度下圆钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J].土木工程学报,2023,56(10):20-31.
YU Lusong, LIU Biao, WANG Li, et al. Experimental study on axial compression performance of CFST stub columns under very-cold ambient temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 20-31.
- [16] LI W, WANG T, HAN L H. Seismic performance of concrete-filled double-skin steel tubes after exposure to fire: experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 154: 209-223.
- [17] 曾翔.火灾全过程作用后钢管混凝土柱滞回性能试验研究[D].长沙:湖南大学,2009.
ZENG Xiang. Experimental research on cyclic behavior of concrete-filled steel tubular columns with sustained axial load after exposure to fire[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [18] 张童.腐蚀与冻融环境下钢管混凝土墩柱静力及结构抗震性能研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
ZHANG Tong. Study on static and seismic performance of concrete filled steel tubular pier in corrosive and freeze thaw environment[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [19] 王力,虞庐松,刘世忠,等.极端温度对高寒高烈度区连续梁桥地震响应的影响[J].桥梁建设,2022,52(2):89-96.
WANG Li, YU Lusong, LIU Shizhong, et al. Effect of extreme temperatures on seismic response of continuous girder bridge in cold and high-seismicity area[J]. Bridge Construction, 2022, 52(2): 89-96.
- [20] 杜新龙,虞庐松,王力,等.极端温度对板式橡胶支座连续梁桥地震响应影响研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(10):210-215.
DU Xinlong, YU Lusong, WANG Li, et al. Study on influence of extreme temperature on seismic response of continuous girder bridge with laminated rubber bearing[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(10): 210-215.
- [21] 李於钱,王力,杜新龙,等.极端温度对钢管混凝土格构式高墩抗震性能影响研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(5):123-129.
LI Yuqian, WANG Li, DU Xinlong, et al. Study on influence of extreme temperature on seismic performance of concrete-filled steel tube lattice high pier[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(5): 123-129.
- [22] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2010[S].北京:中国标准出版社,2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部.低温环境混凝土应用技术规范:GB 51081—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for application of concrete under cryogenic circumstance: GB 51081—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

(本文编辑:张向红)