•复杂艰险山区重大工程与环境•
DOI:10.12454/j.jsuese.202500307
本刊网刊

寒区圆钢管微膨胀混凝土加固钢管约束混凝土柱拟静力试验研究

王　力[1],张　杰[1],马　骏[2],李子奇[1],虞庐松[1],李健宁[1]
(1.兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070;2.中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730030)

摘　要:为研究高寒地区震损钢管约束混凝土柱加固后的抗震性能,设计6根圆钢管约束混凝土柱试件,通过低周往复加载至破坏后,采用不同壁厚的外包圆钢管夹层灌注高强微膨胀混凝土对试件进行加固,并开展加固后试件在不同环境温度下的拟静力试验,探究寒区采用外包圆钢管夹层灌注高强微膨胀混凝土加固钢管约束混凝土柱的抗震性能,揭示外包钢加固震损钢管约束混凝土柱在不同环境温度下的震损机理。结果表明:常温工况下,采用圆钢管夹层灌注高强微膨胀混凝土加固后,钢管约束混凝土柱受损截面处加固效果显著,塑性铰区域由柱脚部位移至外包钢顶部,加固柱较原柱水平承载力提高19.8%,延性提高8.0%,验证了该加固方法的可靠性;加固后试件在不同环境温度下的破坏形态均为压弯塑性铰破坏,在距离外包钢上缘约3 cm位置发生鼓曲破坏;环境温度越低,加固柱越易发生破坏,且破坏程度较常温试件更严重;低温工况下,加固柱较常温柱水平承载力最大提升22.7%,而位移延性系数显著降低,最大降低率达38.3%。

关键词:钢管约束混凝土柱;抗震性能;加固;拟静力试验;环境温度
中图分类号:TU398　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0081-11

钢管约束混凝土(steel tube confined concrete,STCC)是一种将混凝土填充于钢管内部的组合结构,钢管加强对核心混凝土的约束而不承受纵向荷载,其因良好的承载能力、抗震性能在高层建筑和桥梁工程中得到了广泛应用[1]。

中国国土幅员辽阔,地理环境呈现出明显的区域差异性,西北地区海拔高,极端天气频繁,昼夜温差大,地震频发,导致该地区的钢管约束混凝土结构遭受的极端温度作用和地震作用的影响远高于其他地区[2]。在寒区环境中,钢–混凝土组合结构力学性能受环境温度影响显著[3]。极端环境极易导致混凝土与钢材的界面黏结性能退化,钢管与混凝土的协同工作能力降低,进而影响结构的耐久性和抗震性能[4]。此外,地震作用会使钢管混凝土柱产生局部屈曲、混凝土压溃,若不及时修复,可能引发结构的整体失效。

在环境温度对钢–混凝土组合柱力学性能的影响方面,严家宝等[5–6]开展了低温下15个普通和高强钢管混凝土柱的轴压试验,分析了低温环境和钢材强度对组合柱轴压性能的影响。王力[7]、潘启仁[8]、虞庐松[9–10]等对不同环境温度下钢–混凝土组合柱轴压、抗震性能进行了试验研究,探究了温度对钢–混凝土组合柱承载力、延性和刚度等力学性能的影响。研究表明,环境低温对钢–混凝土组合柱的抗震性能有不利影响。在钢–混凝土组合柱加固方面,Aleksandar[11]、Alamoodi[12]、Yan[13]、Zhao[14]等采用纤维增强混凝土、钢管夹层混凝土加固钢筋混凝土并进行轴压和偏压试验,加固后柱的极限承载力、刚度和延性显著提升。Zhang[15]、Min[16]等采用钢管自密实混凝土、钢管加固钢筋混凝土柱并进行低周往复试验,研究表明,与钢筋混凝土柱相比,加固柱的强度、延性、耗能能力和抗扭能力显著提升。Chen等[17]采用玻璃纤维布加固受损钢筋混凝土梁,表明玻璃纤维布加固有效恢复了受损梁的受弯性能,极限弯矩恢复率在86.9%～102.2%之间。杨炳等[18]采用外包碳纤维布和外包钢套加固方钢

收稿日期:2025－04－25　**修回日期:**2025－08－21　**网络出版日期:**2025－09－28
基金项目:国家自然科学基金项目(52668088);中建市政西北院科技计划(XBSZKY2526);甘肃省自然科学基金青年项目(25JRRA207);甘肃省联合科研基金重点项目(24JRRA869)
作者简介:王　力(1993—),男,副教授,博士.研究方向:寒区组合结构抗震.E-mail:wangli1993@mail.lzjtu.cn

管混凝土柱并进行拟静力试验，结果表明采用外包钢套加固方钢管混凝土柱的抗震性能优于采用外包碳纤维布加固方钢管混凝土柱的抗震性能。Yu[19]等对圆钢管混凝土内部进行加肋处理，研究了加肋高度和轴压比对抗震性能的影响，表明加肋高度的增加能够提高试件的水平承载力、延性和耗能能力，轴压比则相反。Xu[20]、Yan[21]、何岸[22]、卢亦焱[23]等采用圆角方钢护套、超高性能混凝土和外套钢管夹层混凝土加固钢管混凝土并进行轴压试验，研究表明加固试件的承载力较未加固试件的承载力显著提升。徐玉野等[24–25]采用薄壁外包钢加固火灾后的混凝土试件，并进行偏压试验和拟静力试验，结果表明外包钢加固能有效提升混凝土试件的延性和受剪承载力。Peng等[26–28]对水泥基灌浆料加固钢筋混凝土的抗弯性能、抗压性能和偏压性能进行了试验研究，与普通钢筋混凝土梁相比，采用水泥基灌浆料加固的钢筋混凝土表现出更大的抗弯和抗压承载力。水泥基灌浆料与混凝土能很好地协同工作，被广泛运用于钢筋混凝土的加固。但目前对钢管约束混凝土的加固还研究甚少。综上，目前钢–混组合柱的加固研究居多是在常温环境下，而对寒区外套钢管加固钢管约束混凝土柱的抗震性能还有待于进一步研究。

为保证寒区桥梁在地震作用下能够快速修复，探究低温环境作用下震损钢管约束混凝土在加固后的抗震性能具有重要意义。本文开展不同环境温度下的外包钢管加固钢管约束混凝土低周往复加载试验，探究高寒地区外包钢加固震损钢管约束混凝土柱的抗震性能的影响机理；探究外包钢壁厚对加固震损钢管约束混凝土柱抗震性能的影响，为西北寒区钢管约束混凝土结构尤其是既有受损结构的加固改造及相关研究提供必要参考。

1 试验概述

1.1 试件设计与制作

为探究低温环境作用下震损钢管约束混凝土柱在加固后的抗震性能，在常温环境下采用低周往复加载方式对6根钢管约束混凝土柱试件进行震损，加载至破坏。试件外钢管直径 D=140 mm、高度 H=1 200 mm、壁厚 t=3 mm，核心混凝土强度等级为C50。破坏后的试件柱脚采用外包钢包裹，并在夹层内灌注高强微膨胀混凝土进行加固处理。

为实现试件与基础的稳固连接，在试件底部制作了一块尺寸为300 mm×300 mm的底板，该底板配置了6个加劲肋，同时，设置了8个螺旋孔，用于将试件与基础固定。在浇筑核心混凝土时，在钢管约束混凝土内部预先埋设温度传感器。对震损破坏的试件，采用 D=165 mm、H=250 mm的钢管进行加固，先将外包钢与底板进行焊接；焊接完成后，在原钢管与外包钢之间的空隙浇筑高强微膨胀混凝土，并进行养护；养护完成之后，将外包钢顶部与原柱采用8 mm的钢筋进行焊接。当试件的浇筑和养护过程全部完成，并且达到试验强度后，对试件的钢管表面进行打磨处理，使其表面光滑、干净，并沿外包钢和原柱钢管的环向均匀布置8组应变片。试件的主要设计参数如表1所示，表中损伤程度，将《钢管约束混凝土柱的性能与设计》[29]中水平承载力下降至峰值承载力的85%，定义为严重。钢管约束混凝土加固过程如图1所示，加固试件如图2所示。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Specimen design parameters

试件编号	损伤程度	L/mm	D/mm	t/mm	T/℃	n
JST20–3–W2	严重	250	165	2	20	0.3
JST–20–3–W2	严重	250	165	2	−20	0.3
JST–40–3–W2	严重	250	165	2	−40	0.3
JST20–3–W3	严重	250	165	3	20	0.3
JST–20–3–W3	严重	250	165	3	−20	0.3
JST–40–3–W3	严重	250	165	3	−40	0.3
ST20–3（对比）	严重				20	0.3

注：试件编号中，J表示加固，S表示原柱试件，T为温度，T20、T–20、T–40分别表示环境温度为20、–20和–40 ℃，3表示原柱试件壁厚为3 mm；W2、W3表示外包钢壁厚为2、3 mm；L为加固高度；D为外包钢直径；t为外包钢壁厚；n为轴压比。

1.2 不同环境温度下的材料性能

核心混凝土采用C50自密实混凝土，每种环境温度下分别制作3个立方体试块（150 mm×150 mm×150 mm）和3个棱柱体试块(150 mm×150 mm×300 mm)，标准养护28 d，按照《混凝土物理力学力学性能试验方法标准》（GB/T50081—2019）[30]测试其在不同环境温度下的立方体抗压强度和弹性模量；灌浆料采用C80高强度无收缩微膨胀水泥基灌浆料，每种环境温度下分别制作3个棱柱体试块（40 mm×40 mm×160 mm），标准养护28 d，按照《水泥基灌浆材料应用技术规范》（GB/T 50448—2008）[31]测得其在不同环境温度下的抗压强度；钢材选用Q235有缝圆钢管，从钢管表面截取标准试件，按照《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》（GB/T 228.1—2010）[32]和《金属材料 拉伸试验 第3部分：低温试验方法》（GB/T 228.3—2019）[33]，通过单向拉伸试验测得其在不同环境温度下的屈服强度值。混凝土、高强微膨胀混凝土和钢材在不同温度工况下的材料性能如表2所示。



图 1　钢管约束混凝土柱加固过程

Fig. 1　STCC columns strengthening process

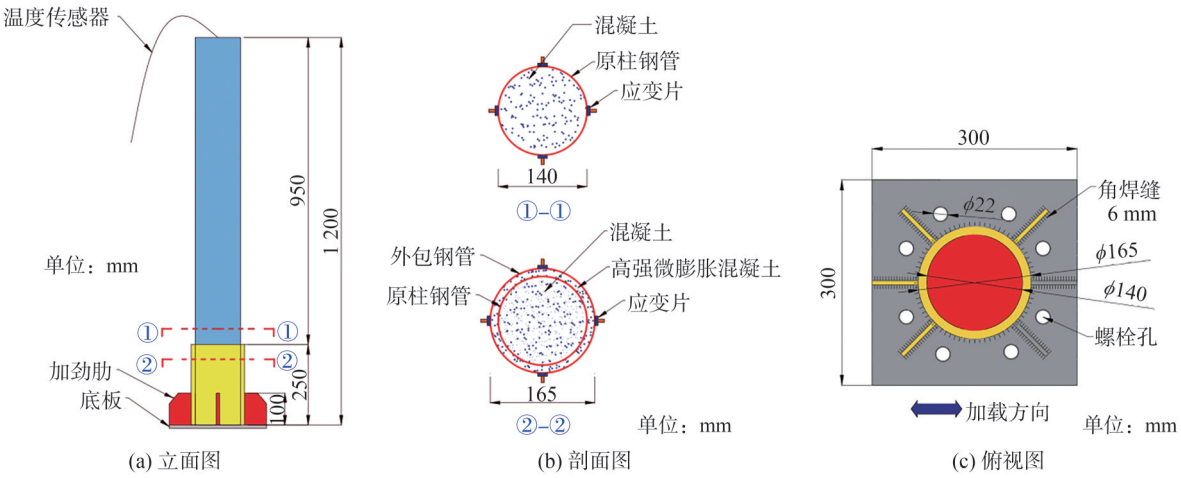


图 2　钢管约束混凝土加固简图

Fig. 2　Schematic diagram of STCC columns strengthening

表 2　试件设计基本参数

Tab. 2　Basic parameters of specimen design

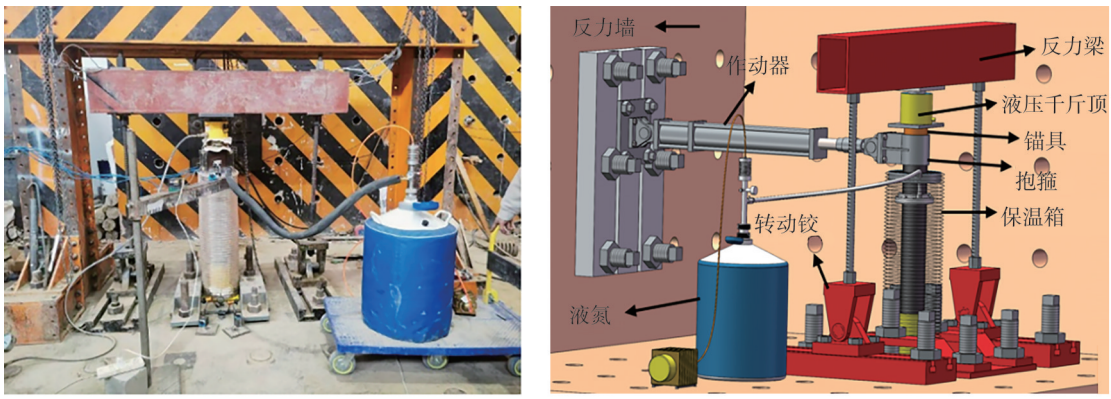
试件编号	温度/℃	壁厚/mm	f_{cu}/MPa	f_{cu1}/MPa	f_y/MPa	E_c/(10^4 N·mm^{-2})
JST20–3–W2	20	2	70.3	68.2	402.4	4.09
JST20–3–W3		3			427.5	
JST–20–3–W2	−20	2	81.2	75.6	411.5	4.20
JST–20–3–W3		3			433.6	
JST–40–3–W2	−40	2	90.8	87.2	445.8	4.31
JST–40–3–W3		3			454.3	

注：f_{cu}为混凝土立方体抗压强度，f_{cu1}为高强微膨胀混凝土抗压强度，f_y为钢材屈服强度，E_c为混凝土弹性模量。

1.3　试验加载装置及加载方案

试验加载装置（图 3）由竖向加载装置与水平加载装置组成。竖向加载装置主要由液压千斤顶对试件施加竖向荷载，液压千斤顶在反力梁的反力作用下，通过锚具将竖向荷载传递至试件；水平加载装置则通过 MTS 作动器对试件施加水平荷载，MTS 作动器在反力墙的作用下，通过抱箍将水平荷载传递给试件；转动铰确保试件在加载过程中保持竖向荷载的稳定。在开展低温工况试验时，先将试件置于超低温环境箱内，使试件温度降至目标温度，并在该温度条件下静置 48 h 后迅速将试件与环境箱进行安装固定，并利用

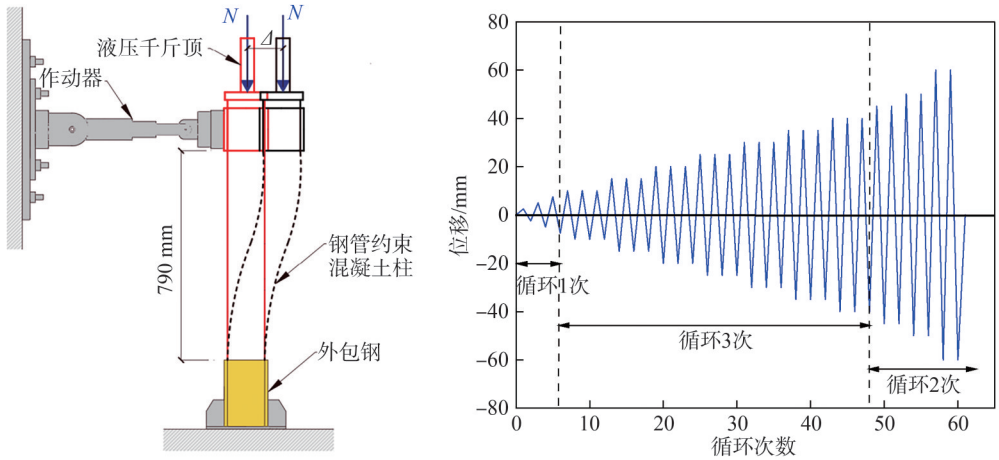
气泵将液氮持续、稳定地输送至环境箱内部，通过液氮的持续供应确保环境箱内部温度能够维持在目标温度，同时，在环境箱内布置温度传感器，实时监测环境温度和试件温度。在正式加载之前，先施加 30% 的轴向压力进行预加载，随后卸载，确保所有设备正常运行。整个加载过程采用位移控制方法，加载模式和加载制度如图 4 所示。图 4 中，Δ 为加载位移，N 为轴向力。根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)[34]，控制方式为变幅位移与等幅位移混合控制，屈服前一般每级荷载反复 1 次，屈服后宜 3 次。本文加载速率采用 0.2 mm/s。在加载位移为±2.5、±5.0、±7.5 mm 时，每级加载循环 1 次。在加载位移为±10～±40 mm 时，每级加载循环 3 次，其中，加载位移在±10～±20 mm 之间时，加载位移步为 5 mm；加载位移在±20～±40 mm 之间时，加载位移步为 10 mm。加载位移在±50 mm 及以后，每级加载循环 2 次，加载位移步为 10 mm，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。



(a) 低温试验现场　　(b) 低温拟静力加载装置

图 3　试验装置图

Fig. 3　Schematic diagram of the experimental setup



(a) 加载模式示意图　　(b) 加载制度

图 4　试件加载模式和加载制度

Fig. 4　Specimen loading mode and loading system

2　试件破坏模式

各试件破坏形态如图 5 所示。

由图 5(a)～(f)可知，常温工况下，试件加固后鼓曲程度相对较高，而在低温工况下，钢管鼓曲程度相对较低。试验结束后，对试件 JS*T*20–3–W3 和 JS*T*–40–3–W3 的外壁钢管进行了切开处理，核心混凝土的损伤模式如图 5(h)～(j)所示。由图 5(h)～(j)可以明显看出，在破坏截面的上方可以观察到一定数量的裂缝，且随着温度的降低，裂缝的数量呈现出增多的趋势。根据图 5(d)与(g)的破坏形态对比可知，原柱试件 S*T*20–3 的塑性铰区域出现在钢管底部距加劲肋约 3 cm 位置，而加固试件 JS*T*20–3–W3 的塑性铰区出现在距离外包钢上部约 3 cm 区域。这一现象表明，外包钢加固对钢管约束混凝土柱试件的受损截面进行了有效的加强，使塑性铰区域向更高位置转移。总体来看，加固后的各试件破坏过程基本相似，皆经历了弹性变形、弹塑性变形和破坏 3 个阶段。各阶段典型破坏模式如图 6 所示。

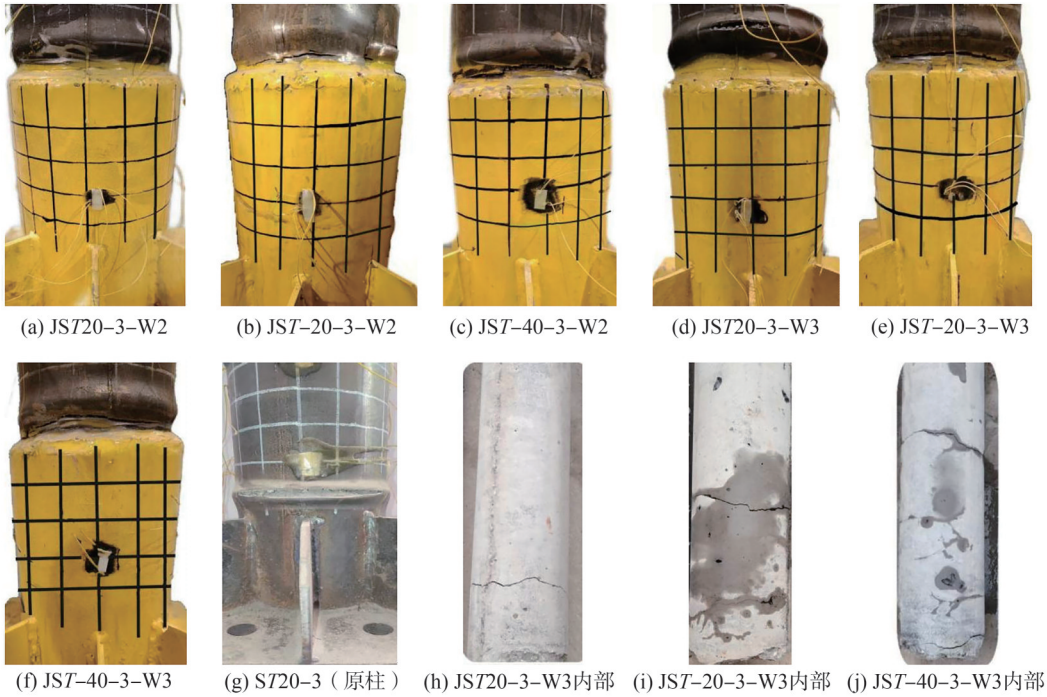


图 5　试件破坏形态

Fig. 5　Failure modes of specimens

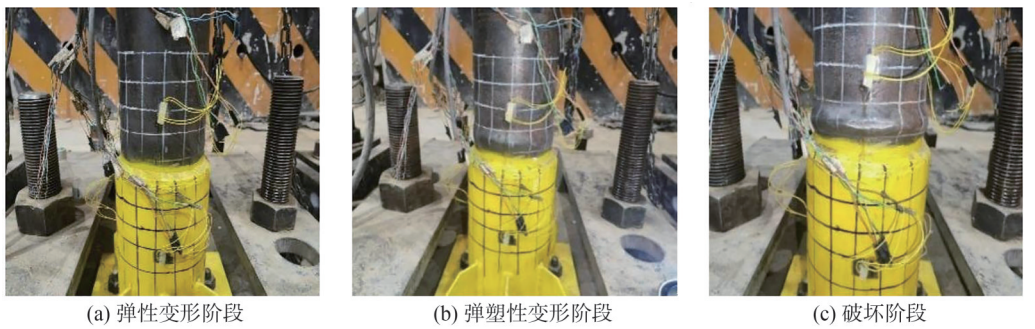


图 6　试件各阶段典型破坏模式图

Fig. 6　Diagram of failure modes at each stage of the specimen

由图6可知：在弹性变形阶段，加载位移为7.5 mm，试件整体变形不明显，钢管表面未发生明显变化；在弹塑性变形阶段，加载位移为30 mm，在距离外包钢上方约3 cm的位置，钢管外表面油漆开始出现剥落，钢管出现轻微鼓曲；在破坏阶段，加载位移为60 mm时，试件达到峰值荷载，随着位移的增加，鼓曲现象进一步加剧，钢管表面出现裂缝，被压碎的混凝土从裂缝流出。

3　试验结果分析

3.1　滞回曲线

各试件滞回曲线如图7所示。图7中，P为承载力。由图7可知，各试件滞回曲线整体形态饱满，无明显捏缩现象。加载初期，滞回环呈线性增长趋势，试件处于弹性变形状态；随位移幅值增大，滞回环面积持续扩展，同时钢管鼓曲变形显著扩大。加载后期，外包钢管上部形成塑性铰，伴随钢管局部断裂与核心混凝土流出，试件承载力发生骤降。通过对比不同温度工况下试件的滞回曲线发现：常温（20 ℃）条件下，滞回曲线形态更为饱满，能量耗散能力显著优于低温环境；而低温（−20、−40 ℃）条件下，试件的水平极限承载力较常温试件显著提升，但其达到峰值荷载后水平承载力骤降，位移延性系数显著降低。滞回曲线在达到各级位移幅值承载力时，由不同循环所得到的滞回环存在一定的强度衰减，说明循环荷载产生的损伤累积致使刚度和承载力降低，但在卸载的过程中，滞回环基本重合在一起，即在同一级循环位移下，滞回曲线的卸载刚度基本没有发生变化。试件在弹性变形阶段的刚度均未发生明显变化，故弹性变形阶段的加、卸载刚度取值均与试件屈服前的初始刚度保持一致；在试件屈服后，卸载刚度均存在不同程度的退化。相较于常温工况，在低温条件下，试件的卸载刚度退化更为迅速。

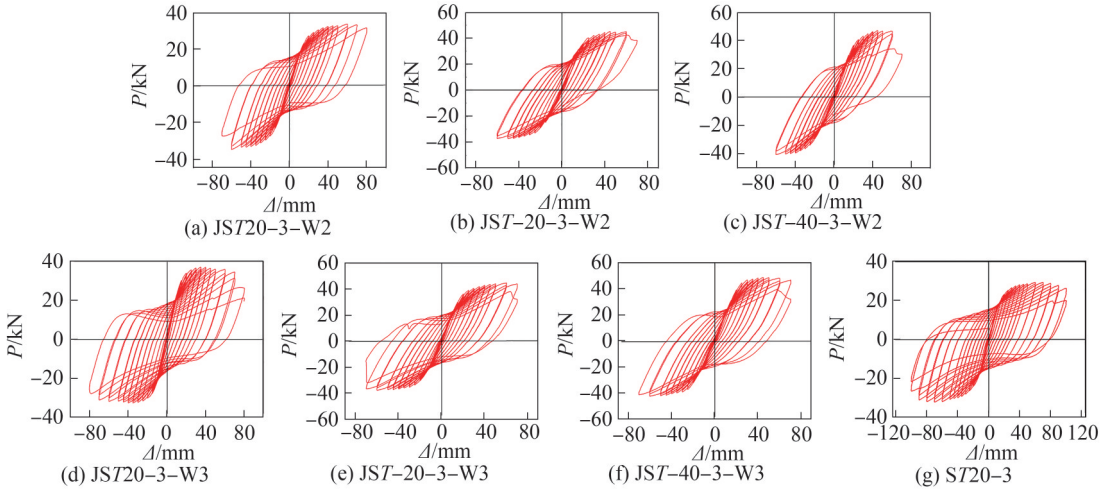


图 7 各试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of specimens

3.2 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图 8 所示。

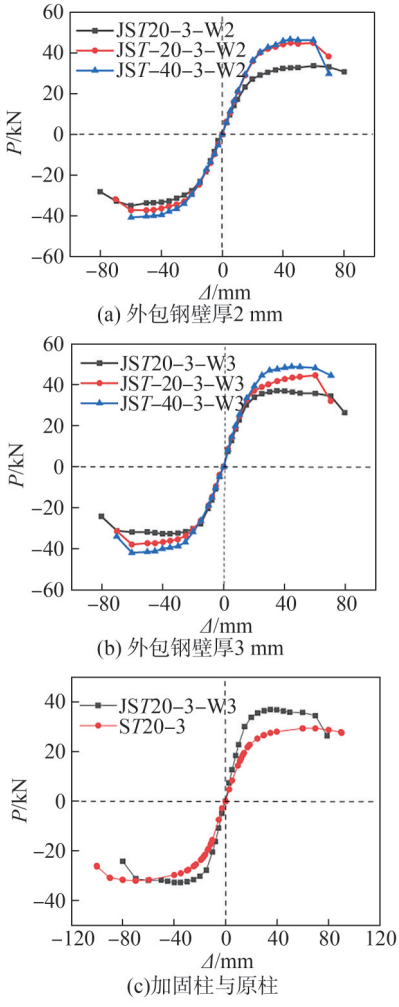


图 8 试验骨架曲线

Fig. 8 Test skeleton curves

由图 8 可知，所有试件的骨架曲线均呈现典型“S”形特征，低温试件的承载力明显大于常温试件。当外包钢壁厚为 2 mm 时，低温试件 JS*T*–20–3–W2、JS*T*–40–3–W2 较常温试件 JS*T*20–3–W2 的水平承载力分别提升 16.4% 和 22.7%；当外包钢厚度为 3 mm 时，低温试件 JS*T*–20–3–W3、JS*T*–40–3–W3 较常温试件 JS*T*20–3–W3 的水平承载力分别提升 15.5% 和 21.9%。究其原因：1）低温环境下混凝土内部孔隙水变成冰体，填充材料内部孔隙，促使试件初始刚度显著增强；2）由于钢材与混凝土的热膨胀系数差异显著，在温度变化时产生温度附加套箍效应[35]。这种复合约束状态改变了材料的应力分布模式，最终导致低温环境下试件的峰值承载力显著提高。由图 8（c）可知，3 mm 壁厚外包钢加固试件（JS*T*20–3–W3）水平极限承载力较未加固的原柱试件（S*T*20–3）提高 19.8%，承载力提升的机理可归因于加固后试件的有效高度降低，导致塑性铰区上移，进而通过应力重分布提高整体的抗侧能力。

各试件的水平承载力如图 9 所示。由图 9 可知，在常温工况下，试件 JS*T*20–3–W3 较试件 JS*T*20–3–W2 的水平承载力提高了 5.7%，在低温（−40 ℃）工况下，试件 JS*T*–40–3–W3 较试件 JS*T*–40–3–W2 的水平承载力提高了 4.5%，表明外包钢壁厚的增加，对原柱的约束增强，水平承载力相应提高。

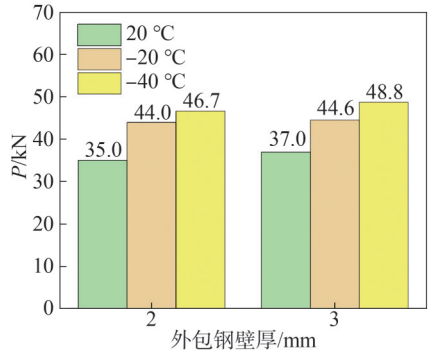


图 9 试件水平承载力

Fig. 9 Lateral load-bearing capacity of specimens

3.3　延性指标

结构位移延性系数 u 作为评价构件延性变形能力的关键参数，其定义为极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值，其中，Δ_u 取值为水平荷载下降至峰值荷载 85% 时对应的位移值，通过几何作图法确定骨架曲线屈服点位移。本文基于 Park 能量等效法计算各试件的延性性能指标，计算结果见表 3。

表 3　试件延性系数

Tab. 3　Ductility coefficient of specimens

试件编号	荷载方向	Δ_u/mm	Δ_y/mm	u	u 平均值
JS*T*20–3–W2	正	80.51	21.94	3.67	3.40
	负	71.78	22.91	3.13	
JS*T*–20–3–W2	正	70.03	23.33	3.00	2.85
	负	70.54	23.58	2.99	
JS*T*–40–3–W2	正	64.07	24.33	2.63	2.52
	负	66.01	26.93	2.45	
JS*T*20–3–W3	正	73.71	16.87	4.37	4.59
	负	74.76	15.54	4.81	
JS*T*–20–3–W3	正	71.30	22.93	3.11	3.23
	负	72.99	21.82	3.35	
JS*T*–40–3–W3	正	70.68	24.46	2.89	2.83
	负	70.10	25.33	2.76	
S*T*20–3	正	100.06	22.37	4.50	4.25
	负	98.09	24.57	3.99	

由表 3 可知：3 mm 壁厚外包钢加固试件 JS*T*20–3–W3 的延性较未加固的原柱试件 S*T*20–3 提高 8.0%；试件的延性系数随着温度的降低而降低，当外包钢壁厚为 2 mm 时，与常温试件 JS*T*20–3–W3 相比，低温试件 JS*T*–20–3–W2、JS*T*–40–3–W2 的延性系数分别降低了 11.7%、25.9%；当外包钢壁厚为 3 mm 时，与常温试件 JS*T*20–3–W3 相比，低温试件 JS*T*–20–3–W3、JS*T*–40–3–W3 的延性系数分别降低了 29.6%、38.3%。这主要是在低温工况下，混凝土和钢材的延性显著降低，导致整体试件延性降低，提早发生破坏。同时，增加壁厚可有效改善延性，在常温下，外包钢壁厚 3 mm 的试件较外包钢壁厚 2 mm 试件的延性系数提高了 26.0%。

各试件的延性系数如图 10 所示。由图 10 可知，在常温工况下，试件 JS*T*20–3–W3 较试件 JS*T*20–3–W2 的延性系数提高了 35%，在低温工况（−40 ℃）下，试件 JS*T*–40–3–W3 较试件 JS*T*–40–3–W2 的延性系数提高了 12.3%，表明外包钢壁厚的增加可有效提高试件的延性系数。

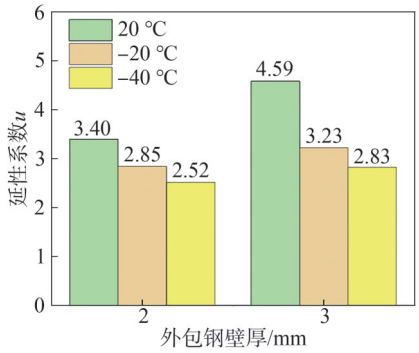


图 10　试件延性系数

Fig. 10　Ductility coefficient of specimens

3.4　累计滞回耗能

结构的耗能能力指的是其在遭受外部荷载时，有效吸收与耗散能量的强弱程度。通常，耗能能力通过构件在反复荷载下形成的滞回环面积来反映，面积越大，表明结构在反复加载过程中能够吸收越多的能量，耗能能力越强。采用能量耗散系数 E_d 和等效黏滞阻尼系数 h_{eq} 来评估试件的耗能能力，按照《建筑抗震试验规程》（JGJ/T101—2015）[34] 中的规定进行计算，h_{eq} 计算简图如图 11 所示，E_d 和 h_{eq} 计算公式如式（1）、（2）所示。

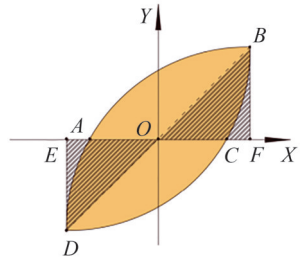


图 11　等效黏滞阻尼系数计算简图

Fig. 11　Schematic diagram for calculating equivalent viscous damping coefficient

$$E_d = \frac{S_{ABCDA}}{S_{\Delta OBF} + S_{\Delta ODE}} \tag{1}$$

$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABCDA}}{S_{\Delta OBF} + S_{\Delta ODE}} \tag{2}$$

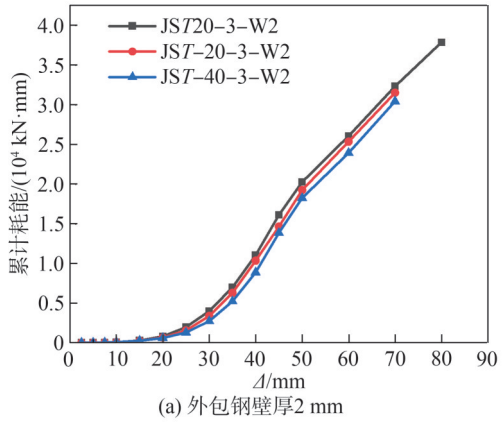
h_{eq} 取每级循环位移中第 1 次循环的等效黏滞阻尼系数，见表 4。

表 4　试件各特征点实测 h_{eq}

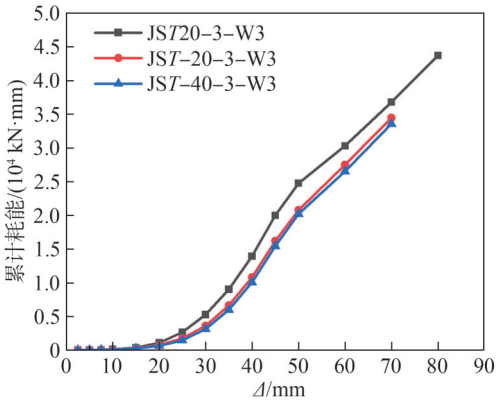
Tab. 4　Measured h_{eq} at characteristic points

试件编号	屈服位移点	极限位移点	破坏位移点
JS*T*20–3–W2	0.199	0.214	0.222
JS*T*–20–3–W2	0.157	0.175	0.202
JS*T*–40–3–W2	0.091	0.114	0.147
JS*T*20–3–W3	0.209	0.212	0.242
JS*T*–20–3–W3	0.164	0.179	0.230
JS*T*–40–3–W3	0.100	0.116	0.167

由表4可知：温度相同时，h_{eq}随外包钢壁厚增加而提高；常温下，外包钢壁厚由2 mm增至3 mm时，h_{eq}提高约15.0%。当环境温度由20 ℃降至−40 ℃时，外包钢壁厚2 mm与3 mm试件的破坏点h_{eq}分别降低33.7%与30.0%。试件的累计滞回耗能曲线如图12所示。



(a) 外包钢壁厚2 mm



(b) 外包钢壁厚3 mm

图 12　各试件累计滞回耗能曲线

Fig. 12　Cumulative hysteretic energy dissipation of specimens

由图12可知，温度降低与外包钢壁厚减小均导致试件总耗能能力下降。具体表现为：当环境温度由20 ℃降至−40 ℃时，外包钢壁厚2 mm与3 mm试件的累计耗能分别减少19%与23%，在常温工况下，外包钢壁厚2 mm试件的累计耗能较3 mm试件降低13%，说明增大外包钢壁厚可有效提升界面约束力，延缓核心混凝土裂缝扩展。

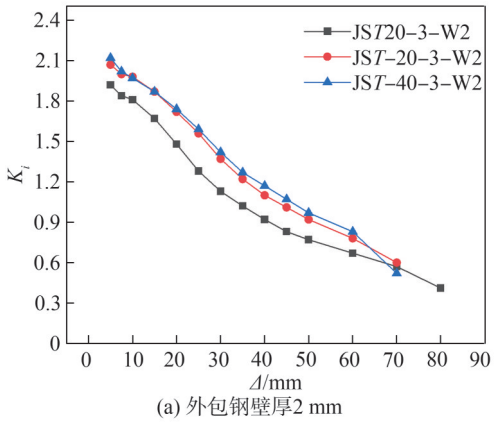
3.5　刚度退化曲线

采用割线刚度K_i来表示在不同环境温度下各试件的刚度退化，割线刚度表达式为：

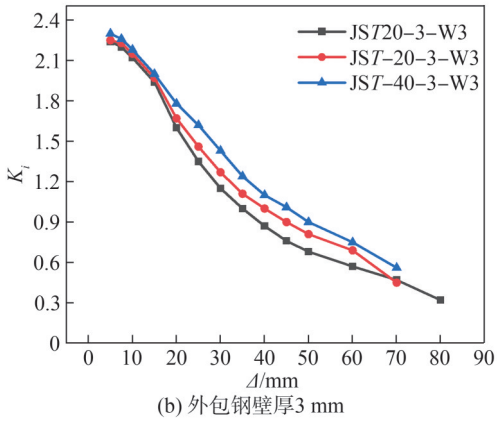
$$K_i=\frac{|P_i|+|-P_i|}{|\Delta_i|+|-\Delta_i|} \tag{3}$$

式中，P_i、$-P_i$为试件第i次加载中正向和负向的水平峰值力，Δ_i和$-\Delta_i$为水平峰值力相对应水平位移。

各试件刚度退化曲线如图13所示。



(a) 外包钢壁厚2 mm



(b) 外包钢壁厚3 mm

图 13　各试件刚度退化曲线

Fig. 13　Stiffness degradation curves of specimens

由图13可知，相比于常温工况，低温工况的初始刚度高于常温工况。在低温工况下，试件的刚度退化更为迅速，尤其是在接近峰值荷载时，试件的刚度下降更为明显。在相同的环境温度下，加载初期的3 mm外包钢试件比2 mm外包钢试件刚度更高，这表明增加外包钢厚度有助于提高试件的初始刚度。

4　结　论

采用不同壁厚的外包圆钢管夹层灌注高强微膨胀混凝土对试件进行加固，并开展该试件在不同环境温度下的拟静力试验，探究寒区环境温度对加固后钢管约束混凝土柱抗震性能影响机理，主要结论如下：

1）采用外包圆钢管夹层灌注高强微膨胀混凝土对震损钢管约束混凝土试件进行加固，加固后试件较原柱试件水平极限承载力提高19.8%，延性系数增加8.0%，验证了本文加固方法的可靠性，可为寒区钢管约束混凝土柱的加固改造提供参考。

2）外包圆钢管夹层灌注高强微膨胀混凝土对钢管约束混凝土柱试件的受损截面进行了有效加强，塑性铰区域由原柱墩脚部位转移至外包钢顶部。加固试

件破坏形态均为压弯塑性铰破坏，主要表现为距离外包钢上部约3 cm位置钢管鼓曲破坏。

3）所有试件滞回曲线均较饱满，无明显捏缩现象，在低温工况下，加固柱的水平承载力较常温工况最大提高22.7%，而位移延性系数最大降低38.3%，寒区低温环境对试件的抗震性能有不利影响。

4）在相同环境温度下，通过增大外包钢管的壁厚，可显著提升外包钢加固钢管约束混凝土柱的水平承载力、延性和累计耗能。

参考文献：

[1] 周绪红,刘界鹏,王宣鼎.钢管约束混凝土结构[M].北京:科学出版社,2023.

[2] Wang Li,Pan Qiren,Zhou Xiaofu,et al.Study on combined effects of bridge temperature and seismic actions based on F–J–M method[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2024,44(2):273–282.[王力,潘启仁,周晓夫,等.基于F–J–M法的桥梁温度与地震作用效应组合研究[J].防灾减灾工程学报,2024,44(2):273–282.]

[3] Wang Li,Liu Shizhong,Li Ziqi,et al.Temperature effect of simply supported composite box girder with corrugated steel webs and composite deck[J].Advanced Engineering Sciences,2022,54(2):133–140.[王力,刘世忠,李子奇,等.组合桥面板–波形腹板钢箱简支组合梁温度效应[J].工程科学与技术,2022,54(2):133–140.]

[4] Wang Li,Pan Qiren,Gu Haowei,et al.Quasi-static tests of steel tube confined concrete columns considering envionmental temperature[J].Journal of Vibration and Shock,2025,44(5):155–168.[王力,潘启仁,顾皓玮,等.考虑环境温度的钢管约束混凝土柱拟静力试验研究[J].振动与冲击,2025,44(5):155–168.]

[5] Yan Jiabao,Yang Xinyan,Luo Yunbiao,et al.Studies on axial compression behaviors of concrete-filled steel tubular columns at low temperature[J].Journal of Building Structures,2021,42(Supp 2):248–255.[严加宝,杨鑫炎,罗云标,等.钢管混凝土柱低温轴压性能研究[J].建筑结构学报,2021,42(增刊 2):248–255.]

[6] Yan Jiabao,Wang Zirui,Luo Yunbiao.Study on eccentric compression performance of ultra-high performance concrete-filled stainless steel tube composite columns in low-temperature environments[J].Journal of Building Structures,2025,46(2):132–140.[严加宝,王子瑞,罗云标.低温环境下圆不锈钢管UHPC组合柱压弯性能研究[J].建筑结构学报,2025,46(2):132–140.]

[7] Wang Li,Hu Qi,Pan Qiren,et al.Experimental study on the influence mechanism of ambient temperature on the seismic performance of steel tube confined concrete columns[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(2):203–214.[王力,胡琦,潘启仁,等.环境温度对钢管约束混凝土柱抗震性能影响机理试验[J].工程科学与技术,2026,58(2):203–214.]

[8] Pan Qiren,Chen Yunfeng,Han Yun,et al.Study on test and calculation method of axial compression bearing capacity of concrete filled steel tube considering ambient temperature[J].Journal of Safety Science and Technology,2024,20(12):97–104.[潘启仁,陈云峰,韩云,等.考虑环境温度的钢管混凝土轴压承载力试验与计算方法研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(12):97–104.]

[9] 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.[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.]

[10] 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.[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.]

[11] Aleksandar L,Bešević M.Experimental research on reinforced concrete columns strengthened with steel jacket and concrete infill[J].Applied Sciences,2021,11(9):4043.

[12] Alamoodi A M,Zahid M,Bakar A B H,et al.Behavior of damaged reinforced concrete columns retrofitted with ultra-high performance fiber reinforced concrete jackets under uniaxial loading[J].Journal of Building Engineering,2025,108:112837.

[13] Yan Yuhong,Li Shan,Huang Yue,et al.Circular reinforced concrete columns strengthened by combined square steel tube and concrete jackets subjected to eccentric load[J].Engineering Structures,2024,320:118881.

[14] Zhao Xiaobo,Lu Yiyan,Liang Hongjun,et al.Optimal design of reinforced concrete columns strengthened with square steel tubes and sandwiched concrete[J].Engineering Structures,2021,244:112723.

[15] Zhang Zhaoqiang,Yi Yuxin,Liao Tian,et al.Seismic performance of RC circular columns strengthened with self-compacting concrete-filled steel tubes[J].International Journal of Steel Structures,2023,23(4):1164–1177.

[16] Min K S,Lee Y H.Steel pipe retrofitting method to enhance the seismic performance of RC column under combined load[J].Engineering Reports,2025,7(7):e70302.

[17] Chen Xiaoqing,Yu Hongfa,Ma Haoxia,et al.Investigation of flexural behaviour of the damaged reinforced concrete beam strengthened by MPC pasting glass fiber reinforced textile[J].Materials and Structures,2025,58(5):198.

[18] Yang Bing,Zha Xinfeng,Peng Wei,et al.Experimental study on seismic behavior of strengthened CFSST columns[J].Jour-

nal of Yangtze University(Natural Science Edition),2015,12(25):46–51.[杨炳,查昕峰,彭威,等.方钢管混凝土柱加固后抗震性能试验研究[J].长江大学学报(自科版),2015,12(25):46–51.]

[19] Yu Zicheng,Luo Zhi,Zhang Juan,et al.Experimental study on hysteretic model of stiffened circular ultra-high-performance concrete filled high-strength steel tube columns[J].Structures,2025,73:108391.

[20] Xu Li,Hu Hongsong,Zhang Linlin,et al.Concentric axial load test for square CFST columns strengthened with steel jackets[J].Journal of Constructional Steel Research,2025,229:109481.

[21] Yan Yan,Xing Zhiquan,Chen Xilong,et al.Axial compression performance of CFST columns reinforced by ultra-high-performance nano-concrete under long-term loading [J].Nanotechnology Reviews,2023,12:20220537.

[22] He An,Cai Jian,Chen Qingjun,et al.Axial compressive experiment on steel-jacket retrofitted column with recycled aggregate concrete[J].Journal of Southwest Jiaotong University,2018,53(6):1187–1194.[何岸,蔡健,陈庆军,等.钢套管再生混凝土加固柱轴压试验[J].西南交通大学学报,2018,53(6):1187–1194.]

[23] Lu Yiyan,Liu Yongda,Liu Zhenzhen,et al.Calculation method for the compression-bending capacity of square concrete-filled steel tube(CFST) columns with square steel jacket and sandwich concrete reinforcement[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2025,45(1):47–58.[卢亦焱,柳永达,刘真真,等.外套方钢管夹层混凝土加固方CFST柱压弯承载力计算方法[J].防灾减灾工程学报,2025,45(1):47–58.]

[24] Xu Yuye,Ren Yakun,Dong Yuli,et al.Seismic performance of concrete columns after fire and strengthened with thin-walled steel tube[J].China Civil Engineering Journal,2017,50(7):39–49.[徐玉野,任亚坤,董毓利,等.外包薄壁钢管加固受火后混凝土柱的抗震性能[J].土木工程学报,2017,50(7):39–49.]

[25] Xu Yuye,Guo Luhao,Ni Yanping,et al.Eccentric compression performance of concrete columns after fire and strengthened with thin-walled steel tube[J].Journal of Building Structures,2020,41(8):143–153.[徐玉野,郭璐豪,倪艳萍,等.外包薄壁钢管加固受火后混凝土柱偏压性能[J].建筑结构学报,2020,41(8):143–153.]

[26] Peng Gang,Niu Ditao,Hu Xiaopeng,et al.Experimental and theoretical study on the flexural behavior of RC beams strengthened with cementitious grout[J].Engineering Structures,2022,267:114713.

[27] Peng Gang,Hu Xiaopeng,Niu Ditao,et al.Behavior of eccentrically loaded rectangular RC columns strengthened with cementitious grout:Experimental and theoretical analysis[J].Journal of Building Engineering,2024,86:108879.

[28] Peng Gang,Hu Xiaopeng,Niu Ditao,et al.Study on the axial compression behavior of RC columns strengthened with cementitious grout[J].Engineering Structures,2023,284:115742.

[29] 周绪红,刘界鹏.钢管约束混凝土柱的性能与设计[M].北京:科学出版社,2010.

[30] 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.

[31] 中华人民共和国住房和城乡建设部.水泥基灌浆材料应用技术规范:GB/T 50448—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.

[32] 国家质量监督检验检疫总局,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.

[33] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料 拉伸试验 第3部分:低温试验方法:GB/T 228.3—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.

[34] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震试验规程:JGJ/T 101—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[35] Wang Li,Pan Qiren,Zhang Yuxing,et al.Analytical calculation method for the axial compressive bearing capacity of steel tube confined concrete considering the additional hoop effect of temperature[J].Advanced Engineering Sciences,2025,57(2):191–202.[王力,潘启仁,张宇星,等.考虑温度附加套箍效应的钢管约束混凝土轴压承载力解析法[J].工程科学与技术,2025,57(2):191–202.]

Quasi-static Testing of Steel Tube-confined Concrete Columns Strengthened with Micro-expansive Concrete Filled Circular Steel Tube in Cold Regions

WANG Li[1], *ZHANG Jie*[1], *MA Jun*[2], *LI Ziqi*[1], *YU Lusong*[1], *LI Jianning*[1]

(1.School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2.Cscec Aecom Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract:

Objective In cold regions, the mechanical performance of steel–concrete composite structures is significantly influenced by the environmental temperature. Extreme conditions can easily degrade the interfacial bond between concrete and steel, reducing the collaborative capacity of the steel tube and concrete, thereby compromising structural durability and seismic performance. Seismic actions can also cause local buckling in steel tube-confined concrete (STCC) columns and concrete crushing, posing a risk of overall structural failure if not rapidly repaired. The northwestern regions of China, characterized by high altitude, frequent extreme plateau weather, rugged terrain with harsh climates, large diurnal tem-

perature variations, and high seismic activity, subject steel tube-confined concrete structures to far more extreme temperature effects and seismic actions than other regions. To enable the rapid repair of bridges under seismic loading in cold regions, it is critical to assess the seismic performance of earthquake-damaged steel tube-confined concrete structures under low-temperature conditions after reinforcement. This study investigates the seismic damage mechanisms of externally steel-reinforced earthquake-damaged steel tube-confined concrete columns under varying environmental temperatures. The results provide a valuable reference to inform the reinforcement and retrofitting of existing damaged structures and related research on steel tube-confined concrete structures in cold regions.

Methods Low-cycle reversed loading tests were performed on six specimens of steel tube-confined concrete columns reinforced with external steel jackets under varying environmental temperatures (−40 ℃, −20 ℃, and 20 ℃). The six specimens were designed by varying the wall thickness of the external steel tube. To simulate seismic damage, the six specimens were subjected to low-cycle reversed loading at ambient temperature until failure. Damaged specimens were then reinforced by encasing the column base in an external steel jacket and filling the interlayer with high-strength micro-expansive concrete. These reinforced specimens were then tested under low-cycle reversed loading at varying environmental temperatures. The failure modes, horizontal bearing capacity, and ductility performance of the reinforced columns under ambient temperature conditions were compared with those of the original columns. The seismic performance indicators of the reinforced specimens, including failure modes, horizontal bearing capacity, ductility, stiffness degradation, and energy dissipation capacity, were comprehensively analyzed to assess the influence of external steel jacket thickness on seismic performance. The results elucidated the seismic damage mechanisms of externally steel-reinforced steel tube-confined concrete columns under different environmental temperatures.

Results and Discussions Under ambient temperature conditions, damaged sections of steel tube-confined concrete columns were effectively strengthened by reinforcing them using a circular steel jacket filled with high-strength micro-expansive concrete. In the original column specimens, the plastic hinge zone appeared approximately 3 cm above the bottom of the steel tube near the stiffener; in the reinforced specimens, this zone shifted to approximately 3 cm below the top of the external steel jacket. This indicates that the external steel jacket reinforcement effectively enhanced the damaged section of the column, shifting the plastic hinge zone upward. As the plastic hinge zone moved from the column base to the top of the external steel jacket, the reinforced column's horizontal bearing capacity increased by 19.8%, and its ductility improved by 8.0% compared to the original column. Under different environmental temperatures, the reinforced specimens' failure mode was characterized by flexural compressive plastic hinge failure, with buckling occurring approximately 3 cm below the top of the external steel jacket. The degree of steel tube buckling deformation was more pronounced at ambient temperatures; however, reduced at low temperatures. The damage pattern of the core concrete showed noticeable cracks above the failure section, with the number of cracks increasing as the temperature decreased. The lower the environmental temperature, the more prone the reinforced column was to failure, and the greater the damage severity compared to specimens tested at ambient temperatures. Under low-temperature conditions, the maximum increase in the reinforced column's horizontal bearing capacity was 22.7% higher than that at ambient temperature, whereas the displacement ductility coefficient decreased significantly, with a maximum reduction of 38.3%. Furthermore, the horizontal bearing capacity increased with the thickness of the external steel jacket. A significant increase in horizontal bearing capacity was observed in the low-temperature compared to the ambient-temperature specimens. Under low-temperature conditions, the pore water within the concrete froze, filling the internal voids of the material and notably enhancing initial stiffness. Because of the significant difference in thermal expansion coefficients between steel and concrete, an additional temperature-induced confinement effect was generated during temperature variations.

Conclusions Low temperature significantly influenced the seismic performance of steel tube-confined concrete-reinforced columns. Environmental temperature and external steel jacket thickness affected the initial stiffness, horizontal bearing capacity, ductility, and energy dissipation capacity of the reinforced specimens to varying degrees, primarily due to temperature-induced additional confinement effects and material property variations. The ductility of steel tube-confined concrete columns was consistently lower under low-temperature conditions than under ambient temperature conditions. This reduction was attributed to the increased brittleness of core concrete and the accelerated development of cumulative damage in low-temperature environments. Increased external steel jacket thickness enhanced the confinement effect on the original column, thereby improving its horizontal bearing capacity and its ductility.

Key words: steel tube confined concrete (STCC); seismic performance; strengthening; quasi-static test; ambient temperature

（编辑　张　琼）

引用格式: Wang Li,Zhang Jie,Ma Jun,et al.Quasi-static testing of steel tube confined concrete columns strengthened with micro-expansive concrete filled circular steel tube in cold regions[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):81–91.[王力,张杰,马骏,等.寒区圆钢管微膨胀混凝土加固钢管约束混凝土柱拟静力试验研究[J].工程科学与技术,2026,58(6):81–91.]