

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202111002

多灾耦合作用下钢管混凝土柱承载性能研究进展*

惠存^{1,2}, 李永刚¹, 李克¹, 海然^{1,2}

(1. 中原工学院建筑工程学院, 河南 郑州 450007;

2. 河南省环境岩土工程与地下工程灾害控制工程研究中心, 河南 郑州 450007)

摘要: 钢管混凝土因其优良的力学性能被广泛应用于工程结构中, 而实际工程中, 钢管混凝土柱并非承受单一荷载, 也可能同时遭受腐蚀、冻融、火灾、撞击和地震等多重灾害的耦合作用。为进一步了解多灾耦合作用下钢管混凝土柱受力性质的改变, 分析耦合作用机理, 避免相关作用对结构长期使用下性能的影响, 围绕国内外钢管混凝土研究进展, 对钢管混凝土柱在耦合作用下的承载性能进行总结和分析, 为相关研究和实际工程应用提供参考。研究表明, 钢管混凝土柱具有良好受压和抗冲击性能, 但抵抗腐蚀、冻融循环和火灾的能力稍弱; 在多灾耦合作用下, 钢管混凝土柱的各项承载性能表现出不同程度的退化, 包括承载力、刚度、延性等; 在腐蚀(火灾)-地震耦合作用下, 试件的抗震性能存在轻微下降, 但滞回曲线较为饱满, 整体抗震性能良好; 在压-弯-剪(扭)复合荷载作用下, 轴压比和剪跨比对钢管混凝土柱的破坏形态和承载性能影响较为显著。虽然有关钢管混凝土的研究取得了丰硕的研究成果, 但在足尺试件性能、标准试验方法和精细化分析模型等方面的研究还有待加强。

关键词: 钢管混凝土柱; 多灾耦合; 承载性能; 受力机理; 破坏机制

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0259-10

Investigation on the Load Bearing Capacity of Concrete Filled Steel Tube Columns under the Couple of Multiple Disasters

HUI Cun^{1,2}, LI Yonggang¹, LI Ke¹, HAI Ran^{1,2}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

2. Research Center of Environmental Geotechnical Engineering and Underground Engineering Disaster Control Engineering in Henan Province, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The concrete filled steel tube (CFST) is widely used in engineering structures due to its excellent mechanical properties. In practical engineering, CFST columns are not subjected to a single load, but may be subjected to the couple action of corrosion, freeze-thaw, impact, fire and seismic action. In order to further understand the change of mechanical properties of CFST under multi-load coupling, analyze the coupling mechanism and avoid the impact of relevant effects on the long-term service performance of structures, the bearing performance of CFST under coupling actions are summarized and analyzed based on the research status and recent progress of CFST at home and abroad. It provides a reference for relevant research and practical engineering application. The results show that CFST has good compression and shock resistance, but weak corrosion, freeze-thaw and fire resis-

* 收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-11-22

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2019GGJS147)、河南省高等学校重点科研项目(20A560026)资助

作者简介: 惠存(1987—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事高性能混凝土材料和结构性能研究。E-mail: hcun@zut.edu.cn

tance. Under the coupling of multiple disasters, the load bearing properties of CFST, including load bearing capacity, stiffness, ductility and so on, show different degrees of degradation. Under the coupling action of corrosion (fire) - earthquake, the seismic performance of the specimens decreases slightly to a certain extent, but the hysteretic curve is full and the overall seismic performance is excellent. Under the coupling action of pressure - bending - shear (torsion) load, the failure modes and load bearing capacity of CFST columns are significantly affected by axial compression ratio and shear span ratio. Although fruitful results have been achieved on CFST, research on the properties of full-size specimens, standard test methods and refined analysis models still need to be strengthened.

Keywords: concrete filled steel tube column; the couple of multiple disasters; load bearing capacity; mechanical mechanism; failure mechanism

引 言

在钢管混凝土结构中,钢管约束核心混凝土可提高混凝土的变形能力和强度,同时核心混凝土可提高钢管的稳定性,保证钢材力学性能的充分发挥,因此钢管混凝土结构具有承载力高、延性好等突出优点,在高层建筑和大跨桥梁结构中得到越来越广泛的应用^[1]。这些结构在服役期间,不仅承受压力、弯矩、剪力和扭矩等荷载作用,还可能遭受冻融作用、意外撞击和火灾等灾害作用,工业污染、酸雨和海洋环境还会对钢管混凝土结构产生腐蚀作用。在多重灾害和荷载耦合作用下,钢管混凝土柱的受力和抗震性能指标将发生改变,本文围绕国内外钢管混凝土研究进展,对承受荷载和腐蚀、冻融循环、冲击荷载和火灾等灾害作用下钢管混凝土柱的受力和抗震性能进行分析。

1 单种荷载作用下钢管混凝土柱受力性能研究

与普通钢筋混凝土结构相比,钢管混凝土结构具有强度高、延性好、施工方便等优点。国内外学者对钢管混凝土柱的力学性能进行了大量的研究,通过不同参数下钢管混凝土柱的受压试验,分析钢管和核心混凝土的受力机理,得到钢管约束下核心混凝土的本构关系,基于截面平衡理论和钢管混凝土统一理论,提出了钢管混凝土柱受压承载力计算方法^[2-4],在此基础上通过试验研究、理论分析和数值模拟研究了钢管混凝土柱抗弯^[5]、抗剪^[6-7]和抗扭^[8]性能。同时,国内外学者对钢管混凝土柱进行

了拟静力试验,分析了含钢率、轴压比、混凝土强度等级、长细比等因素对其抗震性能的影响,并结合试验结果提出了钢管混凝土柱的恢复力模型和承载力计算方法^[9-13]。钢管混凝土力学性能研究结果表明,在压力、弯矩、剪力等荷载作用下,钢管混凝土柱的承载力大于钢管和混凝土承载力之和,产生 $1+1>2$ 的组合效应;在低周反复荷载作用下,钢管混凝土柱的滞回曲线饱满,承载力、变形能力、延性和耗能能力均高于相同条件下的普通混凝土柱。

不同使用环境的钢管混凝土结构,可能处于腐蚀、冻融的环境中,也可能遭遇车辆船舶的撞击^[14],或是火灾的影响,在这些灾害作用下,钢管混凝土柱的受力和抗震性能都会发生改变。实际工程中钢管混凝土柱承受单种荷载作用的情况相对较少,多处在多灾耦合环境下,因此有必要对多灾耦合作用下钢管混凝土柱的受力性能进行系统研究。

2 两种灾害(荷载)耦合作用下钢管混凝土柱受力性能研究

在腐蚀、冻融、撞击和火灾作用下,钢管混凝土柱一般同时承担压力、弯矩、剪力和扭矩的作用,相比单种荷载作用,两(多)种荷载耦合的作用受力机理更为复杂。

2.1 腐蚀-受压耦合作用

工业污染、海洋环境和酸雨腐蚀对建筑结构的安全性与耐久性产生了严重的影响,对于钢管混凝土柱,腐蚀环境会导致钢管锈蚀,进而影响其力学性能。

L.H.Han等^[15]和C.Hou等^[16]控制轴压比和腐蚀

程度,设计制作了17根短柱和11根梁,研究轴压比、腐蚀程度的改变对试件极限承载能力的影响,结果显示实测结果与规范计算得出的理论结果吻合较好。王庆利等^[17]研发了长期荷载-氯盐腐蚀耦合作用试验装置,对钢管混凝土轴压短柱和在浓度为3.5%的NaCl溶液中腐蚀的钢管混凝土柱进行下长期荷载试验研究,试验结果表明,试件刚度降低仅与长期荷载有关,试件承载力的减小和刚度的降低与腐蚀关联很大,随着腐蚀程度提高,承载力降幅可达13%,刚度降幅最高可达60%;持载-腐蚀耦合作用要大于单纯持载作用和单纯腐蚀作用两者的简单叠加,且随着持载等级和浸入程度的增大而更加明显。陈梦成等^[18-21]对酸雨腐蚀后不同截面形状(圆形和方形)、不同混凝土类型(普通混凝土和再生混凝土)的钢管混凝土柱受压性能进行了深入的研究(图1),研究结果表明,酸雨腐蚀规律总体上与电化学腐蚀试验吻合较好,随着腐蚀率的增加,试件的极限承载力、刚度和延性均有不同程度地下降。

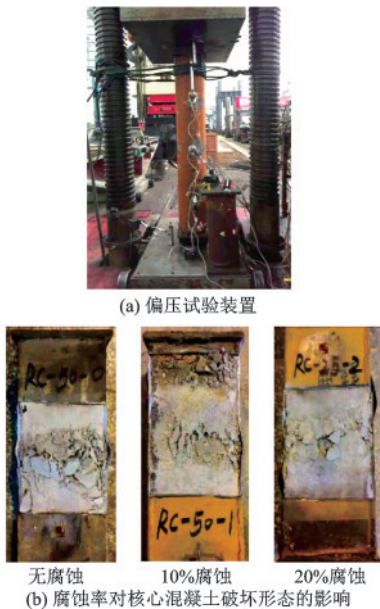


图1 加载装置及破坏形态^[19]

Fig.1 Loading device and destruction form^[19]

综上,氯盐和酸雨腐蚀不仅使钢管厚度变薄,其屈服强度、抗拉强度、弹性模量和延伸率也有一定程度的下降,造成钢管混凝土柱承载力、刚度和延性下降,进而造成钢管混凝土柱整体受力性能下降,甚至可能成为重大工程事故的主要诱因。因此对于处于腐蚀环境下的钢管混凝土构件有必要

采取切实有效的防腐措施以提高其使用寿命。

2.2 冻融循环-受压耦合作用

我国南北温差大,北方冬季温度可低至 -60°C ,冻融破坏较为常见,钢管混凝土结构的核心混凝土虽有外层钢管的保护,但在极寒环境下,仍会造成钢管混凝土结构的破坏。近些年钢管混凝土冻融破坏的工程事故频发,引起广大学者的关注并对钢管混凝土在受冻融循环作用下的力学性能进行了研究。

王凯等^[22]的研究结果表明,冻融循环次数对方钢管混凝土柱的轴压性能影响较大,随着冻融循环次数的增加,试件的承载力和刚度明显下降,延性系数则随冻融循环次数的增加而增加,经100次冻融循环后增幅可达28%,而方钢管混凝土柱的破坏形态受冻融循环作用影响较小。王坚等^[23]研究了冻融循环作用下圆钢管混凝土柱的力学性能,也得到类似的结论,同时发现冻融循环对轴压试件的钢管鼓曲位置有影响:未冻融试件鼓曲主要发生在钢管端部,而冻融试件主要发生在钢管中部(图2)。杨有福等^[24-26]研究了冻融循环次数、钢管壁厚和核心混凝土强度对钢管混凝土柱力学性能的影响,结果表明冻融循环对试件的破坏形态和荷载-变形曲线影响不大,冻融试件的承载力、延性和组合弹性模量均略低于未冻融试件,并基于试验结果提出了冻融循环作用后核心混凝土的本构关系。冻融循环对钢管混凝土柱受压性能的影响,文献[22]、[23]和文献[24-26]得到的规律略有不同,这主要是因为文献[22]、[23]在进行钢管混凝土柱的冻融时,试件两端没有焊接盖板,两端的混凝土直接暴露在冻融环境中,试验结果受冻融程度影响较大,而文献[24-26]在进行冻融试验时,柱两端盖板使核心混凝土处于封闭状态,受冻融作用的影响较小,进而说明当柱端采取密封措施时,钢管混凝土可适用于遭受冻融作用的地区。

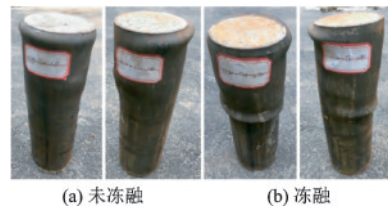


图2 钢管混凝土柱冻融-轴压破坏形态^[23]

Fig.2 Freeze-thaw-axial compression failure mode of concrete-filled steel tube columns^[23]

综上,冻融循环作用使混凝土的强度和弹性模量降低,进而导致冻融循环后钢管混凝土柱的受压承载力、延性和弹性模量有不同程度的降低,对于钢管混凝土构件,由于构造的原因,混凝土的含水率很难达到饱和,另外由于有钢管的包裹,混凝土的冻融损伤得到一定程度的控制,使得钢管混凝土柱具有较好的抗冻性。

2.3 火灾-受压耦合作用

近年来,结构构件的防火性能越来越受到人们的重视,国内外学者通过受火试验和数值模拟,研究了钢管混凝土柱的防火性能和火灾后剩余承载力。

朱国政等^[27]应用截面叠加法研究了火灾下T形截面钢管混凝土柱的轴压承载力,结果表明,火灾前45分钟T形钢管混凝土柱由于钢管裸露受火后承载力迅速下降,降幅最高可达67%,说明高温火灾环境对T形截面柱的轴压性能有较大影响。韩林海等^[28]研究了钢管混凝土柱在标准升温曲线后受压性能的变化规律,结果表明火灾对钢管混凝土柱的破坏形态影响不显著,受火后钢管混凝土柱的承载力降幅在20%~60%,而涂有防火涂层的试件受火后承载力降低幅值在6%~22%,防火涂层可有效缓解受火后钢管混凝土柱受压承载力的降低。李毅等^[29]通过有限元模拟了火灾全过程中方钢管混凝土短柱的轴压性能,结果表明受火时混凝土和钢管的纵向应力分布与截面温度场分布有关,火灾中钢管与混凝土分离,导致套箍作用减弱,受火时间、防火保护层厚度和截面尺寸对方钢管混凝土柱轴压剩余承载力均有影响。焦东^[30]建立了火灾后钢管混凝土柱相继热力耦合模型,以剩余承载力影响系数比较分析了受火对方钢管混凝土轴压性能的影响,得到了与文献[29]相近的结论,还提出了剩余承载力影响系数简化计算公式,给出了该公式的适用范围。

为了增强钢管混凝土的耐火性能,有学者提出在普通钢管混凝土内配置纵向钢筋,形成配筋钢管混凝土,把防火措施从被动的防火变为主动防火^[31-32]。M.L.Romero等^[33]通过钢管纤维混凝土空心长柱和钢管配筋混凝土在火灾下的试验研究,表明构件火灾下的性能与核心混凝土的强度关系较大,加配钢筋比添加纤维更能提高试件的承载力。魏锦^[34]将普通钢管混凝土柱的承载力公式推广到

配筋钢管混凝土柱,得到常温下圆形和方形配筋钢管混凝土柱的承载力公式,最终推导出了配筋钢管混凝土柱耐火性能的理论公式。

综上,钢管混凝土在遭遇火灾时,外层钢管快速升温,自身强度急剧下降,对核心混凝土也失去了约束作用,导致钢管混凝土在火灾下的承载力迅速下降。火灾后钢管混凝土柱的剩余承载力的降低程度与受火时间、保护层厚度和截面尺寸等因素有关。目前钢管混凝土构件的防护措施包括防火涂料、外包水泥砂浆或者防火板等,在钢管混凝土内配置钢筋形成配筋钢管混凝土也能有效提高构件的防火性能。

2.4 冲击荷载-火灾(受压)耦合作用

钢管混凝土结构在服役期间可能遭受意外撞击,武汉长江大桥自建成通车以来曾被撞击多次,北京有50%以上的高架桥都遭受过车辆的撞击,在遭受撞击的同时常会发生火灾,因此有必要加强对撞击和火灾耦合作用的研究。

已有研究成果表明,钢管混凝土柱具有良好的抗侧向冲击性能^[35-38]。对于钢管混凝土柱受冲击-火灾耦合作用的性能研究,史艳莉等^[39]提出了钢管混凝土构件在火灾与撞击联合作用下的数值计算方法,数值模拟结果表明,温度对钢管混凝土构件的侧向撞击性能影响明显,随着温度升高,构件跨中挠度大幅增加,撞击时程变长,高温下的撞击时程比常温下增大的幅度可达66%;高温下构件的撞击力时程曲线与常温下差异明显,随着温度升高,构件的抗撞击性能逐渐降低。霍静思等^[40]开展了标准火灾作用下钢管混凝土短柱落锤动态撞击试验研究,也得到类似的规律。

在冲击和撞击荷载-压力耦合作用下,由于材料应变率及惯性力等的影响,结构的受力状态、内力分布以及承载力都与静态荷载作用下有很大不同。曾希等^[41]开展了圆形钢管混凝土柱横向落锤冲击及竖向静力抗压试验(图3),试验结果表明虽然施加的是轴心压力,但由于横向冲击导致试件变形,最终的破坏形态均为偏心破坏,试件的剩余承载力与冲击能量负相关。章琪等^[42]基于有限元分析模型,采用准静态计算方法给出了钢管混凝土柱受撞击后剩余受压承载力计算公式。

综上,钢管混凝土柱在撞击作用下,钢管和混凝土都会受到一定的损伤;侧向冲击荷载较大时,



图3 落锤试验机装置^[41]

Fig.3 Drop hammer tester device^[41]

构件还可能会产生残余变形,此时构件的受力状态和承载力都会发生较大变化,严重时将会影响结构的使用安全。因此,不仅要研究侧向冲击荷载作用下钢管混凝土柱的承载性能,而且要进行抗冲击设计;评估钢管混凝土柱在侧向冲击荷载作用后的剩余承载力,也是钢管混凝土结构应用中的一个关键问题。

2.5 腐蚀(火灾)-地震耦合作用

我国属于地震多发区,当地震和其它灾害同时作用时,钢管混凝土柱的抗震性能将发生变化,有必要对其进行深入研究。

陈梦成等^[43-44]对模拟酸雨腐蚀的圆形和方形钢管混凝土柱进行了抗震性能试验研究,研究结果表明,在相同轴压比下,随着腐蚀程度的加深,试件的承载力、延性、初始刚度和粘滞阻尼系数都随之降低,试件腐蚀程度对其抗震性能的影响更显著。邓歆玥^[45]采用钢材弹性模量和强度折减的方法模拟酸雨腐蚀的影响,构建了酸雨腐蚀后钢管混凝土柱劣化分析模型,分析结果表明,相同轴压比下随着钢管锈蚀率的增大,试件的抗震性能逐渐降低。林晓康等^[46]进行了火灾下钢管混凝土柱的低周往复加载试验,结果表明,火灾后试件的滞回曲线饱满,未出现明显的捏缩,但抗弯刚度和水平极限承载力较常温下有一定幅度的降低,增大截面加固后可恢复到未受火状态。曾翔^[47]采用电加热和燃气加热的复合升温方法模拟火灾环境,研究了受火后钢管混凝土柱的抗震性能(图4),试验结果表明,与常温构件相比,加热后钢管混凝土柱的承载力和刚度下降,延性和耗能能力有所提高,环线刚度退化变缓。

在地震发生后有可能发生火灾,T.Elnaz等^[48]研究了地震后钢管混凝土柱的抗火性能,对试件依次开展低周往复试验和受火试验,结果表明震损后的钢管混凝土柱仍具有良好的抗火性能。



图4 火灾-抗震耦合试验装置^[47]

Fig.4 Fire-seismic coupling test device^[47]

综上,在腐蚀(火灾)-地震耦合作用下,钢管混凝土柱的滞回曲线饱满,其刚度和承载力有一定程度的下降,整体表现出良好的抗震性能。

3 三种及以上荷载耦合作用下钢管混凝土柱受力性能研究

3.1 压-弯-剪(扭)耦合作用

钢管与混凝土的相互作用使得钢管混凝土更适合用于受压构件,实际工程中的钢管混凝土柱,往往处于压-弯-剪(扭)复合受力状态,相比单向受压,多种荷载耦合作用下钢管混凝土柱的受力机理更为复杂。

李志强等^[49]对作用等值反号弯矩的矩形钢管混凝土中短柱进行压-弯-剪试验研究,结果表明随着跨高比的增大,试件的破坏模式由剪切破坏发展为弯曲破坏,轴压比小于0.36时不会改变试件的破坏模式,但对承载力有一定的影响。谢力等^[50]开展的方中空夹层钢管混凝土柱压-弯-剪受力性能试验也得到类似的结论,同时发现轴压比大的试件受剪承载力略低。王宇航等^[51]开展了钢管混凝土弯-剪和弯-剪-扭加载试验(图5),研究结果表明在弯-剪和弯-剪-扭复合受力作用下,试件横截面在弹性阶段符合平截面假定,弯-剪荷载下试件的破坏发生在最大弯矩截面处,而弯-剪-扭荷载下试件的破坏模式取决于弯扭比。王亚晋等^[52]采用已有文献的试

验数据对自建的有限元模型进行了验证,对矩形钢管混凝土柱双向压弯剪受力性能进行了分析研究,给出了压弯剪构件的受力全过程关系曲线。方小舟等^[53]发现压弯作用下钢管混凝土柱的受剪承载力与剪跨比、轴压比和初始弯矩有关,初始弯矩的存在使试件的抗剪承载力有一定程度的降低。L.H.Han等^[54-55]利用有限元模型分析了钢管混凝土柱在复合受力状态下的受力机理和破坏形态,对不同加载路径进行了对比分析。鲜威等^[56]采用经过试验验证的ABAQUS模型对圆钢管混凝土压弯剪构件进行了全过程分析,发现剪跨比和轴压比对试件的承载力和刚度都有不同程度的影响。

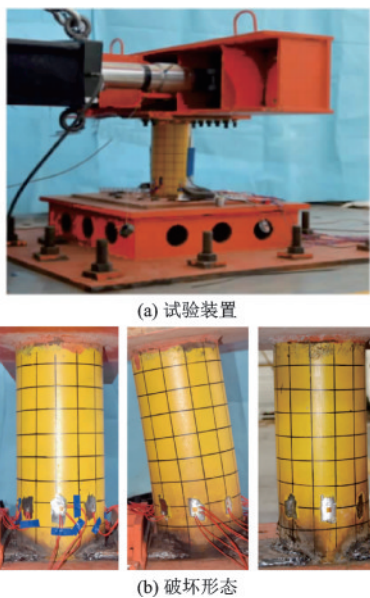


图5 钢管混凝土柱弯-剪-扭试验^[51]

Fig.5 Bending-shear-torsion test of concrete-filled steel tube columns^[51]

综上,在压-弯-剪(扭)复合应力作用下,钢管混凝土的力学性能较受单一荷载不同,呈现出剪切破坏、弯剪破坏和弯曲破坏等不同的破坏形态,主要原因是多种荷载共同作用时,试件受压区面积发生改变,导致约束效应和单一荷载差异较大,进而影响其力学性能。

3.2 腐蚀-冻融-受压耦合作用研究

在冻土地区和高纬度沿海地区,腐蚀和冻融循环是影响钢管混凝土柱受力性能的重要因素,开展腐蚀、冻融、压力耦合影响下钢管混凝土柱力学的研究是十分必要的。彭震^[57]进行了氯离子盐雾侵蚀、冻融循环以及两种因素相耦合的钢管混凝土短

柱的受压试验(图6),研究结果表明盐雾腐蚀和冻融循环均使钢管混凝土柱的承载力、延性系数和弹性模量减低,由于钢管和混凝土之间的约束作用,盐雾腐蚀和冻融循环耦合作用时导致的钢管混凝土承载力降低值比两个条件单独发生时的钢管混凝土承载力降低值之和较小。



图6 冻融-腐蚀下钢管混凝土柱轴压破坏形态^[57]

Fig.6 Axial compression failure mode of concrete-filled steel tube column under freeze-thaw-corrosion^[57]

现阶段对钢管混凝土柱在腐蚀-冻融耦合作用下的受力性能研究成果较少,尚需对耦合作用后钢管混凝土柱的偏压、抗剪及抗震性能进行深入研究。

4 结论和展望

通过对多灾耦合作用下钢管混凝土柱受力性能研究的分析,得出以下结论:

(1)钢管混凝土柱具有良好受压和抗冲击性能,但抵抗腐蚀、冻融循环和火灾的能力稍弱,在结构设计时需做好应对偶然作用的措施。

(2)在腐蚀、冲击荷载和火灾耦合作用下,钢管混凝土柱的受压性能表现出不同程度的退化;在冻融循环作用下,核心混凝土的强度和弹性模量减低,进而导致冻融循环后钢管混凝土柱的受压承载力、延性和弹性模量有不同程度的降低。

(3)在腐蚀(火灾)-地震耦合作用下,钢管混凝土柱的滞回曲线饱满,试件的刚度和承载力有一定程度的下降,整体表现出良好的抗震性能。

(4)在压-弯-剪(扭)复合应力下,钢管混凝土柱由于跨高比、弯扭比和剪跨比的不同呈现不同的破坏形态,在轴压比较小时,轴压比的增大会提高其承载力。

(5)在实际工程中,对不同使用环境下的钢管混凝土结构应在设计阶段做好应对措施,使用过程中定期检查,避免结构在长期使用下因灾害造成承载性能损失,进而导致安全事故发生。

目前大量学者对钢管混凝土柱在腐蚀、冻融、火灾和撞击作用下的受力性能进行了深入研究,取得了丰硕的研究成果,但在一些方面有待进一步补充完善:

(1)实际灾害作用和试验模拟存在差异,尤其是对腐蚀作用,实验室加速腐蚀和自然状态腐蚀的差异有待研究,足尺试件在不同灾害荷载作用下的受力性能研究有待加强。

(2)标准试验方法有待统一,目前的冻融试验多采用混凝土快速试验装置进行冻融试验,有必要建立统一的更适合钢管混凝土结构的冻融试验方法。

(3)多种灾害耦合作用下的有限元分析模型尚不精确,缺乏相关理论支撑,需要进一步开发相关程序模块模拟腐蚀、冻融、火灾和撞击作用。

(4)不同灾害-荷载耦合下钢管混凝土柱的受力性能需进一步研究,提供更多的试验样本,为钢管混凝土柱的在特殊工况下的应用推广提供理论依据。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2016.
Han L H. Concrete-filled steel tube structure-theory and practice [M]. Third edition. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构(修订版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Cai S H. Modern steel tube concrete structure (revised edition) [M]. Beijing: People's Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [3] Han L H, Liu W, Yang Y F. Behavior of thin walled steel tube confined concrete stub columns subjected to axial local compression [J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(2): 155-164.
- [4] 陈宝春, 欧智菁, 王来永, 等. 钢管混凝土偏心受压承载力试验分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 838-844.
Chen B C, Ou Z J, Wang L Y, et al. Experimental study on carrying capacity of concrete filled steel tubular column under eccentric load [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2002, 30(6): 838-844. (in Chinese)
- [5] 于清, 陶忠, 陈志波, 等. 钢管约束混凝土纯弯构件抗弯力学性能研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 187-193.
Yu Q, Tao Z, Chen Z B, et al. Flexural behavior of steel tube confined concrete members under pure bending [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 187-193. (in Chinese)
- [6] 钱稼茹, 崔瑶, 方小舟. 钢管混凝土柱受剪承载力试验[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 1-9.
Qian J R, Cui Y, Fang X Z. Shear strength tests of concrete filled steel tube columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(5): 1-9. (in Chinese)
- [7] 蔡健, 梁伟盛, 林辉. 方钢管混凝土柱抗剪性能试验研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2012, 29(3): 189-194.
Cai J, Liang W S, Lin H. Experimental study on shear resistance performance of concrete filled square steel tubular columns [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2012, 29(3): 189-194. (in Chinese)
- [8] 宋顺龙, 王静峰, 江汉, 等. 椭圆钢管混凝土受扭性能及抗扭承载力计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(7): 952-959.
Song S L, Wang J F, Jiang H, et al. Torsional behavior and ultimate torsional strength calculation of ECFST [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(7): 952-959. (in Chinese)
- [9] Zhou X H, Liu J P. Seismic behavior and strength of tubed steel reinforced concrete (SRC) short columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(7): 885-896.
- [10] Han L H, Yang Y F. Cyclic performance of concrete-filled steel CHS columns under flexural loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(4): 423-452.
- [11] Denavit M D, Hajjar J. Nonlinear seismic analysis of circular concrete-filled steel tube members and frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(9): 1089-1098.
- [12] 吕西林, 陆伟东. 反复荷载作用下方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(2): 2-11.
Lyu X L, Lu W D. Seismic Behavior of Concrete-filled Rectangular Steel Tubular Columns Under Cyclic Loading [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(2): 2-11. (in Chinese)
- [13] Julia M, Michel B. Cyclic testing of concrete-filled circular steel bridge piers having encased fixed-based detail [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(1): 14-23.
- [14] Ellis B R, Dillon P J. Road vehicle impacts on buildings in the UK- regulation and risk [J]. The Structural Engineer, 2003, 81: 36-40.
- [15] Han L H, Hou C, Wang Q L. Square concrete filled

- steel tubular (CFST) members under loading and chloride corrosion: experiments[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 71(1):11-25.
- [16] Hou C, Han L H, Zhao X L. Full-range analysis on square CFST stub columns and beams under loading and chloride corrosion [J]. *Thin-Walled Structures*, 2013, 68:50-64.
- [17] 王庆利,冯立明,屈绍娥.圆钢管混凝土轴压短柱在长期荷载-氯盐腐蚀耦合作用下的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(增):48-52.
Wang Q L, Feng L M, Qu S E. Experimental study on axially compressed circular concrete-filled steel tubular stub columns under long-term coupling effects of loading and chloride corrosion [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(Sup):48-52. (in Chinese)
- [18] 陈梦成,陈娜茹.局部腐蚀对圆钢管混凝土柱轴向承载力的影响分析[J]. *华东交通大学学报*, 2019, 36(3):80-89.
Chen M C, Chen R N. Influence of Localized Corrosion on axial bearing capacity of circular steel tube concrete column [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2019, 36(3):80-89. (in Chinese)
- [19] 陈梦成,方苇,黄宏.模拟酸雨腐蚀钢管混凝土构件静力性能研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(2):34-43.
Chen M C, Fang W, Huang H. Static behavior of corroded concrete-filled steel tubular members by simulating acid rain solution [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(2):34-43. (in Chinese)
- [20] 陈梦成,林博洋,黄宏.锈蚀方钢管混凝土短柱轴压承载力研究[J]. *钢结构*, 2017, 32(5), 110-116.
Chen M C, Lin B Y, Huang H. Research on the bearing capacity of corroded square concrete filled steel tubular short column [J]. *Steel Construction*, 2017, 32(5):110-116. (in Chinese)
- [21] 黄宏,胡志慧,朱琪,等.酸雨环境下方钢管再生混凝土偏心受压试验研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(4):91-97.
Hang H, Hu Z H, Zhu Q, et al. Mechanical Study of Recycled Concrete-filled Square Steel Tubes Subjected to Compression-bending under Acid Rain [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(4):91-97. (in Chinese)
- [22] 王凯,刘文豪,陈誉,等.冻融循环作用下方钢管混凝土短柱性能研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(4):1250-1255.
Wang K, Liu W H, Chen Y, et al. Investigation on mechanical behavior of square CFST stub columns after being exposed to freezing and thawing [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2017, 42(4):1250-1255. (in Chinese)
- [23] 王坚,陈誉,刘超,等.冻融循环作用下圆钢管混凝土短柱性能研究[J]. *钢结构*, 2017, 32(10):34-37.
Wang J, Chen Y, Liu C, et al. Research on the bearing capacity of corroded square concrete filled steel tubular short column [J]. *Steel Construction*, 2017, 32(10):34-37. (in Chinese)
- [24] 杨有福,曹凯,杨志泉,等.冻融循环作用后钢管混凝土轴压短柱力学性能[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(3):51-57.
Yang Y F, Cao K, Yang Z Q, et al. Mechanical properties of concrete-filled steel tubular after freezing and thawing cycles under axial loading [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(3):51-57. (in Chinese)
- [25] Yang Y F, Cao K, Wang T Z. Experimental behavior of CFST stub columns after being exposed to freezing and thawing Cold Regions [J]. *Science and Technology*, 2013, 89(5):7-21.
- [26] 沈小盛,张晓勇,方焰,等.冻融循环后圆钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 56(5):34-42.
Shen X S, Zhang X Y, Fang Y, et al. Experimental research on axial compression behavior of circular CFST short columns after freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 56(5):34-42. (in Chinese)
- [27] 朱国政,孙浩,孙强.高温(火灾)下T形截面钢管混凝土柱轴压承载力研究[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(6):852-855.
Zhu G Z, Sun H, Sun Q. Research on axial compression capacity of concrete-filled steel tubular columns with t-shaped section under high temperature (Fire) [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2018, 36(6):852-855. (in Chinese)
- [28] 韩林海,杨有福,霍静思.钢管混凝土柱火灾后剩余承载力的试验研究[J]. *工程力学*, 2001, 18(6):100-108.
Han L H, Yang Y F, Huo J S. Tests on the residual strength of concrete filled steel tubular columns after exposure to fire [J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(6):100-108. (in Chinese)
- [29] 李毅,王志滨.方钢管混凝土短柱的火灾后剩余承载力研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2015, 13(6):79-84.
Li Y, Wang Z B. Research on residual loading capacity of concrete-filled square steel tube stub columns after exposure to fire [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2015, 13(6):79-84. (in Chinese)
- [30] 焦东.非均匀火灾作用下方形钢管混凝土短柱剩余承载力研究[J]. *火灾科学*, 2017, 26(3):168-174.

- Jiao D. Residual lading capacity of concrete-filled square steel tube stub columns in non-uniform fires [J]. *Fire Safety Science*, 2017, 26(3):168-174. (in Chinese)
- [31] Romero M L, Moliner V, Espinos A, et al. Fire behavior of axially loaded slender high strength concrete-filled tubular columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(12):1953-1965.
- [32] Huo J S, Zeng X, Xiao Y. Cyclic behaviours of concrete-filled steel tubular columns with pre-load after exposure to fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(4):727-739.
- [33] Romero M L, Moliner V, Espinos A, et al. Fire behavior of axially loaded slender high strength concrete-filled tubular columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(12):1953-1965.
- [34] 魏锦. 加筋钢管混凝土柱的耐火性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
Wei J. Analysis of fire performance for reinforced concrete filled steel columns (RCFS) [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [35] Deng Y H, Tuan C Y. Design of concrete-filled circular steel tubes under lateral impact [J]. *ACI Structural Journal*, 2013, 110(4):691-701.
- [36] Wang R, Han L H, Zhao X L, et al. Experimental behavior of concrete filled double steel tubular (CFDST) members under low velocity drop weight impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 91:72-81.
- [37] Deng Y H, Tuan C Y, Xiao Y. Flexural behavior of concrete-filled circular steel tubes under high-strain rate impact loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(3):449-456.
- [38] Yang Y F, Zhang Z C, Fu F. Experimental and numerical study on square RACFST members under lateral impact loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 111:43-56.
- [39] 史艳莉, 纪孙航, 王文达, 等. 高温作用下钢管混凝土构件侧向撞击性能[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 30(3):15-21.
Shi Y L, Ji S H, Wang W D, et al. The lateral impact performance of concrete-filled steel tubular (CFST) members at high temperatures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 30(3):15-21. (in Chinese)
- [40] 霍静思, 任晓虎, 肖岩. 标准火灾作用下钢管混凝土短柱落锤动态撞击试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(4):9-20.
Huo J S, Ren X H, Xiao Y. Impact behavior of concrete-filled steel tubular stub columns under ISO-834 standard fire [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(4):9-20. (in Chinese)
- [41] 曾希, 李锐, 杜国锋. 横向冲击后圆钢管混凝土柱剩余轴压承载力研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(23):23-30.
Zeng X, Li R, Du G F. Research on residual axial bearing capacity of CFST columns with circular cross-section subjected to lateral impact [J]. *Building Structure*, 2019, 49(23):23-30. (in Chinese)
- [42] 章琪, 蒋庆, 陆新征. 侧向冲击对钢管混凝土受压承载力影响研究[J]. *结构工程师*, 2013, 29(3):59-64.
Zhang Q, Jiang Q, Lu X Z. Lateral impact effects on the compressive strength of concrete filled steel tubes [J]. *Structural Engineers*, 2013, 29(3):59-64. (in Chinese)
- [43] 陈梦成, 张凡孟, 黄宏, 等. 模拟酸雨腐蚀下方钢管混凝土抗震性能研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(6):106-114.
Chen M C, Zhang F M, Huang H, et al. Study on seismic performance of concrete filled square steel tubes subjected to simulated acid rain attack [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(6):106-114. (in Chinese)
- [44] 陈梦成, 林博洋, 黄宏. 酸雨腐蚀后圆钢管混凝土柱抗震性能研究[J]. *铁道科学工程学报*, 2017, 14(1):142-148.
Chen M C, Lin B Y, Huang H. A study of seismic performance for circular concrete filled steel tubular column under acid rain attack [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(1):142-148. (in Chinese)
- [45] 邓歆玥. 酸雨环境下钢管混凝土桥墩抗震性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Deng X Y. Study on Seismic Behaviors of Concrete-filled Steel Bridge Pier under Acid Rain Attack [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [46] 林晓康, 韩林海. 火灾作用后圆钢管混凝土柱荷载-位移滞回性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(3):19-29.
Lin X K, Han L H. Load-displacement hysteretic behavior of concrete filled CHS columns after exposure to ISO-834 standard fire [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(3):19-29. (in Chinese)
- [47] 曾翔. 火灾全过程作用后方钢管混凝土柱滞回性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
Zeng X. Experimental research on cyclic behavior of concrete-filled steel tubular columns with sustained axial load after exposure to fire [D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)
- [48] Talebi E, Korzen M, Hothan S. The performance of concrete filled steel tube columns under post-earthquake fires [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018,

- 32(9):85-95.
- [49] 李志强,陈以一,王伟.矩形钢管混凝土中短柱弯-剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(7):1-8.
Chen Z Q, Chen Y Y, Wang W. Experimental research on bending and shearing behavior of middle and short concrete filled steel tubular columns[J].Journal of Building Structures,2015,36(7):1-8. (in Chinese)
- [50] 谢力,林博洋,袁方,等.方中空夹层钢管混凝土柱压-弯-剪受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(增1):230-234.
Xie L, Lin B Y, Yuan F, et al.Experimental study on mechanical performance of square concrete filled double-skin steel tubular columns under compression-bending-shear loading conditions [J].Journal of Building Structures,2017,38(Sup1):230-234. (in Chinese)
- [51] 王宇航,李硕,周绪红,等.弯-剪-扭耦合荷载作用下钢管混凝土短柱受力性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(11):1-12.
Wang Y H, Li S, Zhou X H, et al.Study on mechanical behavior of concrete filled steel tubular short columns under compound bending-shear-torsion load [J].Journal of Building Structures,2017,38(11):1-12. (in Chinese)
- [52] 王亚晋,范重,候超,等.矩形钢管混凝土构件双向压弯剪受力性能研究[J].建筑结构学报,2019,39(9):145-153.
Wang Y J, Fan Z, Hou C, et al.Research on performance of rectangular concrete-filled steel tube members under biaxial compression bending and shear[J].Journal of Building Structures,2019,39(9):145-153. (in Chinese)
- [53] 方小舟,林轶,钱稼茹.压弯作用下钢管混凝土短柱受剪承载力试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(8):36-44.
Fang X Z, Lin Y, Qian J R.Experimental study on shear capacity of concrete-filled steel tube stub columns subject to compressive and bending forces[J].Journal of Building Structures,2010,31(8):36-44. (in Chinese)
- [54] Han L H, Yao G H, Tao Zh.Behaviors of concrete filled steel tubular members subjected to combined loading[J].Thin-walled Structures,2007,45(6):600-619.
- [55] Han L H, Tao Zh, Yao G H.Behaviour of concrete filled steel tubular members subjected to shear and constant axial compression [J]. Thin-walled Structures,2008,46(3):765-780.
- [56] 鲜威,史艳莉,王文达.圆钢管混凝土压弯剪构件受力性能分析[J].建筑科学,2017,33(9):13-20.
Xian W, Shi Y L, Wang W D.Research of circular concrete-filled steel tubular members subjected to shearing and axial compression [J]. Building Science,2017,33(9):13-20. (in Chinese)
- [57] 彭震.冻融循环与氯盐腐蚀耦合条件下钢管混凝土短柱的力学性能研究[D].西安:西京学院,2019.
Peng Zh.Research on mechanical property of concrete filled steel tubular short column subjected to freeze-thaw cycle and salt spray corrosion[D].xi'an:Xiijing University,2019. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)