

钢管-UCA短柱轴压承载力试验研究

李迎昊^{1,2}, 王康宁^{1,2}, 王奥迪^{1,2}

(1. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 湖北 武汉 430034; 2. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

摘要: 为研究钢管-UCA短柱轴压性能, 设计UCA-4、UCA-6、UCA-8和C70-6四组试件, 分析混凝土类别、钢管壁厚以及强度对破坏模式、荷载-位移曲线和套箍效应的影响, 并基于试验结果, 对多种轴压承载力计算公式进行评估。结果表明, UCA-4与UCA-6试件套箍系数较低呈剪切型破坏, UCA-8与C70-6试件套箍系数较高为腰鼓形破坏。提高钢管强度和壁厚能提高试件极限承载力和套箍效应, 而增强混凝土强度仅能提升试件极限承载力, 对套箍效应无明显增强。评估承载力时, 按照《钢管混凝土结构技术规程》(DBJ/T 13-51—2020)计算误差均在10%以内, 具有良好的准确性和工程适用性。依据某上承式钢筋混凝土拱桥主拱圈尺寸, 在轴压承载力相近条件下, 内填UCA材料相较于C70可减少钢材用量12%, 缩减混凝土体积23%。

关键词: 超高性能混凝土; 轴压承载力; 试验研究; 计算方法; 工程应用

中图分类号: U444; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0084-05

Experimental Study on Axial Compressive Bearing Capacity of Steel Pipe-UCA Short Column

LI Yinghao^{1,2}, WANG Kangning^{1,2}, WANG Aodi^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Wuhan 430034, China; 2. China Railway Bridge Science Research Institute, Co., Ltd., Wuhan 430034, China)

Abstract: In order to study the axial compression performance of steel pipe-UCA short columns, four groups of specimens (UCA-4, UCA-6, UCA-8 and C70-6) are designed to analyze the effects of concrete type, steel pipe wall thickness and strength on failure mode, load-displacement curve and hoop effect. Based on the results, a variety of axial compression bearing capacity calculation formulas are evaluated. The results show that the low hoop coefficient of UCA-4 and UCA-6 specimens presents shear-shaped failure, and the high hoop coefficient of UCA-8 and C70-6 specimens is waist-drum-shaped failure. The increase of strength and wall thickness of steel pipe can improve the ultimate bearing capacity and hoop effect of the specimen, and the increase of concrete strength can only improve the ultimate bearing capacity of the specimen with no significant enhancement to the hoop effect. During the evaluation of bearing capacity, the calculation errors are all within 10% according to the *Technical Code for Concrete-filled Steel Tube Structures* (DBJ/T 13-51—2020), which has good accuracy and engineering applicability. Based on the dimensions of the main arch ring of a deck-type reinforced concrete arch bridge, under similar axial compressive bearing capacity conditions, the UCA material filled inside can reduce the steel usage by 12% and the concrete volume by 23% compared with C70.

Keywords: ultrahigh performance concrete; axial compressive bearing capacity; experimental study; calculation method; engineering application

0 引言

钢管混凝土结构凭借高承载力、高耐久性、高效施工、高经济性及造型美观等优势^[1], 近年来在桥梁、建筑、地下结构及港口工程等领域广泛应用。然而, 实际工程中结构荷载和承载力要求的提升, 导致

钢管强度普遍提高。在此情况下, 普通混凝土的性能逐渐难以满足日益增长的承载力需求, 其强度、耐久性等方面的局限性愈发凸显^[2]。

相关学者通过将钢管混凝土中的内填混凝土替换为超高性能混凝土(UHPC), 以解决普通混凝土强度低、易空鼓、套箍效应弱的问题。UHPC以其超高强度、低收缩和致密的特性, 能与钢管壁紧密结合, 进一步发挥套箍效应, 从而提升构件的承载力。赖志超等^[3]发现, 钢管-UHPC柱有良好的轴压性能; 提

收稿日期: 2025-12-02

作者简介: 李迎昊(1998—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

高混凝土抗压强度可显著提升轴压承载力和刚度。韦建刚等^[4]表明,高强钢管内填UHPC相较于普通混凝土可明显改善钢管的局部鼓曲和内填混凝土的脆性特征。王彦博等^[5]指出钢管-UHPC的破坏模式分为腰鼓型破坏和剪切型破坏两种,建议匹配高强度钢管使钢管-UHPC试件获得更高的残余承载力和延性。

然而,UHPC受超低水灰比影响,基体收缩变形特征明显^[6],导致其与钢管界面贴合度降低,脱黏和脱空风险上升,钢管对UHPC的约束作用难以有效发挥,进而影响二者协同工作性能。相关研究^[7]表明,在UHPC中掺入适量粗骨料制备的超高性能混凝土(ultra-high performance concrete with coarse aggregate, UCA),不仅能减少胶凝材料用量、降低成本,还可借助粗骨料的骨架效应缓解混凝土收缩^[8],从而缓解钢管与内填混凝土的脱黏现象。吴方红^[9]和曾彦钦等^[10]对钢管-UCA柱轴压性能开展研究,发现该结构具有良好的轴压承载能力,其破坏形态与钢管-UHPC类似,均随套箍系数的变化呈现剪切型或腰鼓型破坏特征。此外,UCA材料在钢管内浇筑时表现出良好的密实性,可有效提升结构的整体性。

基于此,本研究以混凝土类别、钢管壁厚及强度为参数,开展钢管-UCA短柱轴压性能试验,分析其破坏模式、荷载-位移曲线及套箍效应。基于试验结果,对多种轴压承载力计算公式的适用性进行评估,并依据某上承式钢筋混凝土拱桥主拱圈尺寸,对比内填UCA与C70材料的经济效益和力学性能。

1 试验方案

1.1 试验设计

为研究混凝土类别、钢管壁厚及强度对钢管-UCA短柱轴压性能的影响,设计了UCA-4、UCA-6、UCA-8和C70-6共4组试件。其中,“UCA”与“C70”表示混凝土类别,“4”、“6”、“8”代表钢管壁厚(单位:mm),钢管外径均为140 mm,高度均为420 mm。相较于UHPC,UCA通过引入粗骨料并优化各组分比例,在确保混凝土性能指标的同时,有效缓解了UHPC因高水胶比体系引发的收缩变形问题。为深入研究钢管壁厚对试件轴心受压性能的影响以及高强钢管与UCA的协同受力特性,4 mm和6 mm厚钢管采用Q345钢材,8 mm厚钢管则选用经热处理的Q420钢材。混凝土和钢管强度指标见表1和表2。

表1 混凝土指标

名称	立方体抗压强度/MPa	棱柱体抗压强度/MPa
UCA	108	78
C70	72	48

表2 钢管指标

厚度/mm	牌号	屈服强度/MPa
4	Q345	364
6	Q345	364
8	Q420	424

1.2 加载方案

试验在MTS 6 000 kN万能试验机上进行,试件加载情况如图1所示。所有试件均为轴心受压,试验开始前进行预加载确认装置与仪表运行正常。初始采用分级力加载的形式,每级50 kN,临近破坏时转为位移控制,每级荷载保持2~3 min。缓慢施加荷载,直至试件承载力降至极限值的80%或钢管明显屈曲,即判定试件破坏并停止加载,期间持续记录位移数据。

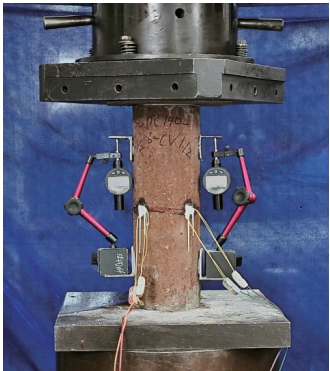
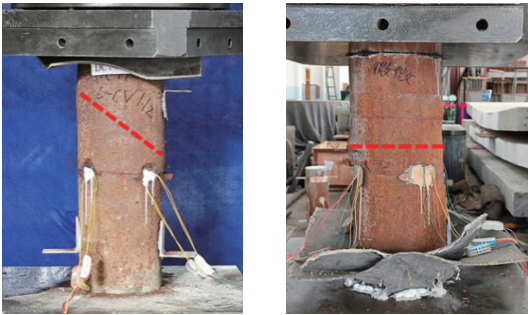


图1 加载示意图

2 试验结果

2.1 破坏模式

UCA-4与UCA-6试件呈现剪切型破坏模式,具体表现为钢管局部鼓曲,且表面出现明显滑动;而UCA-8与C70-6试件则表现为腰鼓型破坏模式,即钢管均匀鼓曲,整体无明显剪切错动(见图2)。



(a) 剪切型破坏 (b) 腰鼓形破坏

图2 试件破坏形态

以剪切型破坏的UCA-6试件为例,加载初期,试件全截面均匀受压,表面无明显变化。当荷载增至1 998 kN(为峰值荷载的70%~80%)时,局部区域开始向外鼓曲;临近2 542 kN(峰值荷载)时,钢管率先屈服,随后内填混凝土达到抗压强度,钢管不同部位鼓曲明显且持续扩展。此后,荷载小幅下降后趋于稳定,而鼓曲变形不断增大,直至试件表面出现明显剪切滑移后最终破坏。同样地,当荷载达到峰值荷载的70%~80%时,腰鼓型破坏试件钢管中部呈现向外鼓曲的趋势,并随着荷载的增加持续扩展,但未出现明显的剪切滑移错动。

2.2 荷载-滑移曲线

如图3所示,各试件的荷载-位移曲线可分为3个阶段:(1)弹性阶段,加载初期至70%~80%峰值荷载,荷载与位移呈线性递增关系;(2)弹塑性阶段,此时荷载增速放缓,荷载-位移关系逐渐由弹性过渡至塑性;(3)塑性阶段,当荷载临近或超过峰值荷载后,剪切破坏试件出现荷载小幅降低,腰鼓型破坏试件临近峰值荷载后基本维持稳定,但两者均伴随钢管鼓曲变形的加剧,位移迅速增大。

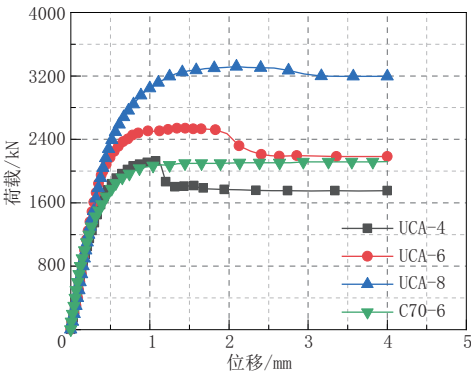


图3 荷载-位移曲线

在力学性能方面,各试件的轴压刚度基本一致,而极限承载力则随混凝土强度、钢管壁厚及强度的提升而增强。具体而言,对于UCA试件,采用提高钢管强度和壁厚的措施可有效提升其极限承载力。UCA-8与UCA-6试件相较UCA-4极限承载力分别提高56%和19%,其中壁厚变化贡献分别占55%和57%,套箍效应贡献分别占45%和43%。相同钢管条件下,UCA-6试件的极限承载力相较C70-6提升20%,其中91%源于UHPC材料强度,9%源于套箍效应。

2.3 套箍效应

通过约束效应系数SI值(极限承载力与截面计算承载力之比)评估钢管-UCA试件的套箍效应,见式(1)。

SI = \frac{N_u}{A_s f_y + A_c f_c} \tag{1}

其中截面计算承载力为钢管和混凝土抗压强度与面积之和,式中:As、Ac为钢管和混凝土的横截面积,mm²;fy和fc为钢管和混凝土的抗压强度,MPa。具体指标参数见表3。

表3 各试件具体指标

试件编号	极限承载力Nu/kN	截面计算承载力/kN	套箍系数	破坏模式	SI
UCA-4	2 129	1 689	0.58	剪切型	1.26
UCA-6	2 542	1 923	0.92	剪切型	1.32
UCA-8	3 318	2 349	1.49	腰鼓型	1.41
C70-6	2 120	1 537	1.49	腰鼓型	1.38

可以看出,试件的破坏模式与套箍系数有关,套箍系数较低的试件呈现剪切型破坏,而套箍系数较高的试件则表现为腰鼓型破坏。此外,所有试件SI值均大于1,表明上述结构形式可有效提升试件的承载能力,并充分发挥材料的受压性能。

对于UCA试件,在钢管直径与核心混凝土类型确定的前提下,随着钢管壁厚的增大、强度的提升,试件的套箍系数随之增大,SI值也相应提高。这表明,提高钢管强度和壁厚可有效增强钢管对核心混凝土的约束作用并提升试件的套箍效应。

对比UCA-6与C70-6试件,二者钢管参数一致,但C70-6的SI值更高,说明提升混凝土强度虽可有效提高试件的极限承载力,但并不能增强试件的套箍效应。进一步对比UCA-8与C70-6试件,二者套箍系数相同,然而UCA-8的SI值更大,这表明在相同套箍系数条件下,钢管与UCA协同作用能更充分地发挥材料力学性能,进而进一步提高试件的极限承载力。

3 承载力计算及经济性分析

3.1 承载力计算公式

随着钢管混凝土领域研究的持续深入,目前已有诸多承载力的计算公式。在钢管混凝土结构应用的早期阶段,通常将钢管和混凝土当作各自独立受力的部分,直接把它们承载力相加来计算整体承载力。规范ACI 318-14^[12]以此为基础,给出了钢管混凝土轴心受压构件承载力,见式(2)。

N_u = A_s f_y + 0.85 A_c f_c \tag{2}

该公式综合考量了钢管和混凝土的承载能力,并在确保安全的前提下,对混凝土强度进行了适当折减。式中:As、Ac为钢管和混凝土截面面积,mm²;

f_y, f_c 为钢管和混凝土的抗压强度,MPa。

文献[13]为充分考虑套箍效应的影响,引入了与套箍系数 θ 有关的钢管纵向容许应力折减系数 k_s 和混凝土抗压强度提高系数 k_c ,见式(3)至式(6)。

$$N_u = k_s A_s f_y + k_c A_c f_c \tag{3}$$

$$k_s = 0.184 \ln \theta + 0.623 \tag{4}$$

$$k_c = 0.427 \ln \theta + 2.156 \tag{5}$$

$$\theta = \frac{f_s A_s}{f_c A_c} \tag{6}$$

式中: A_{sc} 为钢管混凝土构件的等效截面面积,mm²。规范 GB 50936—2014^[11]通过套箍系数 θ 将钢管和混凝土抗压强度换算成整体钢管混凝土构件抗压强度,并引入系数 $B、C$ 来考虑截面形状影响,具体计算见式(7)。

$$N_2 = (1.212 + B\theta + C\theta^2) f_c A_{sc} \tag{7}$$

DBJ/T 13-51-2020^[14]计算钢管混凝土构件承载力时,同样采用将钢管和混凝土承载力换算为钢管

混凝土承载力的方法,并通过套箍系数 θ 进行修正。不过,该规范针对不同的钢管混凝土截面,采用不同的系数来计算构件承载力,具体见(8)、式(9)。

$$N_u = f_{sc} A_{sc} \tag{8}$$

$$f_{sc} = (1.14 + 1.02\theta) f_c \tag{9}$$

对各规范计算结果与试验值的对比分析(见表4)表明:ACI 318-14^[12]因未考虑钢管对混凝土的套箍效应,其计算结果普遍偏低,约为试验值的70%,较为保守;文献[13]引入相关系数后,计算误差均控制在10%以内,但部分计算结果高于试验值,存在一定的安全隐患;GB 50936—2014^[11]虽考虑了进行了强度换算,与试件结果的吻合情况较好,但部分试件计算值偏低,未能充分考虑材料的力学性能,具有一定的安全冗余度。而 DBJ/T 13-51—2020^[14]的计算结果与试验数据吻合良好,误差均在10%以内且小于理论值,具有更高的准确性和工程适用性。

表4 各规范计算结果与试验值对比

单位:kN

试件编号	N_u /kN	ACI 318-14		文献[13]		GB 50936—2014		DBJ/T 13-51—2020	
		N_1 /kN	N_1/N_u	N_2 /kN	N_2/N_u	N_3 /kN	N_3/N_u	N_4 /kN	N_4/N_u
UCA-4	2 129	1 529	72%	2 381	112%	2 130	100%	2 083	98%
UCA-6	2 542	1 773	70%	2 684	106%	2 321	91%	2 491	98%
UCA-8	3 318	2 207	67%	3 172	96%	2 405	72%	3 198	96%
C70-6	2 120	1 444	68%	2 077	98%	1 781	84%	1 964	93%

3.2 经济性分析

某上承式钢筋混凝土拱桥主拱圈原采用管径900 mm、壁厚44 mm的Q500qD 劲性骨架钢管并内填C70混凝土,依据截面承载力等效原则,优化为直径

800 mm、壁厚44 mm、填充材料为UCA的钢管。承载力计算按规范 DBJ/T 13-51—2020^[14],工程量和经济性对比情况见表5。

表5 UCA 与 UHPC 经济性分析

型式	钢管尺寸		轴压承载力/10 ³ kN	每延米材料用量			
	直径/mm	壁厚/mm		钢材/t	C70/m ³	UCA/m ³	成本/万元
C70	900	44	106.41	0.93	0.52	—	1.25
UCA	800	44	107.40	0.82	—	0.40	1.23

注:综合单价估算^[15],C70 861 元/m³,UCA 4 000 元/m³,钢材 13 000 元/t。

在轴压承载力相近的条件下对比分析表明:相较于C70混凝土,内填UCA材料可降低总成本2%,减少钢材用量12%,缩减混凝土体积23%;材料用量的优化减轻了结构自重,进而提升了施工效率。此外,UCA中掺入的粗骨料凭借其骨架效应,可有效改善UHPC因高水胶比导致的收缩问题^[16],降低钢管内核心混凝土脱空风险,更契合工程实际应用需求。

6 结 论

(1)UCA-4 与 UCA-6 试件套箍系数较低呈剪切型破坏,UCA-8 与 C70-6 试件套箍系数较高为腰鼓

型破坏。力学性能上,各试件轴压刚度基本相同,极限承载力随混凝土强度、钢管壁厚及强度提升而增强。UCA-8 与 UCA-6 试件相较UCA-4 极限承载力分别提高56%和19%,其中壁厚变化贡献分别占55%和57%,套箍效应贡献分别占45%和43%;UCA-6 试件的极限承载力相较C70-6 提升20%,其中91%源于UHPC材料强度,9%源于套箍效应。

(2)所有试件SI值均大于1,该结构形式可有效提升试件的承载能力,并充分发挥材料的受压性能。同时,提高钢管强度和厚度可增强套箍效应,而提高混凝土强度仅能提升极限承载力,对套箍效应无明显

显增强。

(3)对多种钢管混凝土柱轴压承载力计算公式的适用性进行评估,结果表明 DBJT 13-51—2020 在考虑套箍效应和材料性能方面更为全面,计算结果与试验值最为吻合,误差仅在 10% 以内,具有更高的计算精度和工程适用性。

(4)基于某上承式钢筋混凝土拱桥主拱圈尺寸,按截面承载力等效原则,以填充 UCA 的钢管替换原内填 C70 混凝土的劲性骨架钢管。结果显示,相较于 C70 混凝土,内填 UCA 材料可降低总成本 2%,减少钢材用量 12%,缩减混凝土体积 23%。

参考文献:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 第3版. 北京:清华大学出版社,2004.
- [2] 陈宝春,李莉,罗霞,等. 超高强钢管混凝土研究综述[J]. 交通运输工程学报,2020,20(5):1-21.
- [3] 赖志超,董翠芬,林玉煌,等. 高强方钢管超高性能混凝土短柱轴压性能研究[J]. 中国公路学报,2025,38(3):343-353.
- [4] 韦建刚,罗霞,欧智菁,等. 圆高强钢管超高性能混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(11):16-28.
- [5] 王彦博,宋辞,赵星源,等. 高强圆钢管混凝土短柱轴压承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(11):221-234.
- [6] 郭绍霖. 用于湿接缝连接的 UHPC 收缩控制研究[J]. 城市道桥与防洪,2022(7):219-222.
- [7] 王康宁,高立强,彭旭民,等. 粗骨料 UHPC 梁抗剪性能试验研究[J]. 桥梁建设,2025,55(3):105-112.
- [8] 王庆平,程志伟,蔡婧怡,等. 粗骨料超高性能混凝土(UHPC-CA)的设计方法、力学与收缩性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品,2025(10):136-142.
- [9] 吴方红. 圆形钢管含粗骨料超高性能混凝土构件受力性能研究[D]. 武汉:武汉大学,2020.
- [10] 曾彦钦,徐礼华,吴方红,等. 钢管含粗骨料超高性能混凝土短柱轴压性能研究[J]. 工程力学,2022,39(10):68-78.
- [11] GB 50936—2014 钢管混凝土结构技术规范[S].
- [12] ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S].
- [13] 刘永健,周绪红. 钢管混凝土桥梁结构理论与创新技术[M]. 北京:人民交通出版社,2022.
- [14] DBJT 13-51—2020 钢管混凝土结构技术规程[S].
- [15] 邵旭东. 基于超高性能混凝土(UHPC)的桥梁新结构—理论、试验与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2022.
- [16] 张晓闯,王俊礼,陈波,等. 考虑粗骨料因素的 UHPC 干燥收缩性能[J]. 水电能源科学,2026,44(2):105-108.

(上接第 67 页)

- 的影响[J]. 建筑材料学报,2023,26(6):604-611.
- [12] 韦亚平,李绍成,王有志,等. 多尺度 MgO 膨胀剂与 SAP 协同作用对 UHPC 力学及收缩性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2023,42(9):3154-3165.
- [13] 薛立红,蔡绍怀. 钢管混凝土柱组合界面的黏结强度(上)[J]. 建筑科学,1996(3):22-28.
- [14] American Institute of Steel Construction. ANSI/AISC 360-16, Specification for structural steel buildings[S]. Chicago: AISC, 2016.
- [15] 武斌,谭卓英,王先伟,等. 钢管混凝土极限黏结强度统一计算方法[J]. 沈阳工业大学学报,2022,44(6):714-720.
- [16] 刘永健,周绪红. 钢管混凝土桥梁结构理论与创新技术[M]. 北京:人民交通出版社,2022.