

方钢管约束密实增强混凝土轴压短柱承载性能研究

高春彦¹, 樊 荣², 刘明洋³, 刘勇飞⁴

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 中钢设备有限公司包头分公司, 内蒙古 包头 014010;
3. 上海宝冶集团有限公司, 上海 201900; 4. 包钢西北创业建设有限公司, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 以钢纤维体积掺量、套箍系数为变化参数, 通过对非约束密实增强混凝土(CRC)和方钢管约束 CRC 棱柱体短柱进行轴向加载试验, 研究了试件的破坏特征、荷载-变形关系、主要特征点指标等, 揭示了各变化参数的影响规律。结果表明: 方钢管约束 CRC 的破坏形态为钢管焊缝不同程度的撕裂破坏, 焊缝撕裂范围内核心 CRC 被压碎, 其破坏形态完全不同于非约束 CRC 的剪切型破坏。方钢管约束使得核心 CRC 轴压强度明显提高, 纵向变形性能大大改善。套箍系数对试件轴压力学性能的影响最为显著, 而钢纤维体积掺量对试件轴压强度和变形能力的影响较小。

关键词: 密实增强混凝土; 钢纤维体积掺量; 套箍系数; 承载力

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0085-08

Performance study on bearing capacities of square steel tubular confined compact reinforced composite axial compression stub columns

GAO Chunyan¹, FAN Rong², LIU Mingyang³, LIU Yongfei⁴

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Inner Mongolia Baotou 014010, China;
2. Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd. Baotou Branch, Inner Mongolia Baotou 014010, China;
3. Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai 201900, China;
4. Baogang Northwest Venture Construction Co., Ltd., Inner Mongolia Baotou 014010, China)

Abstract: With the steel fiber volume content and confinement coefficient as variable parameters, the axial loading tests were completed on the unconfined compact reinforced composite (CRC) and the square steel tubular confined CRC prismatic stub columns, the failure characteristics, load-deformation relationships and the main characteristic point indexes of specimens were studied, and the influence laws of variable parameters were revealed. The experimental results show that the welds of steel tube were torn in various degree and the core CRC within the weld tearing range were crushed for the square steel tubular confined CRC specimens, whose failure mode are completely different from the shear failure of the unconfined CRC specimens. The axial compressive strength of core CRC significantly increases and the longitudinal deformation performance greatly improves due to the constraint of steel tube. The confinement coefficient has the most significant effect on the axial compression performance of the confined CRC, while the steel fiber volume content has little effect on the axial compressive strength and deformation capacity of confined CRC.

Key words: compact reinforced composite (CRC); steel fiber volume content; confinement coefficient; bearing capacity

CRC(全称 Compact Reinforced Composite), 即密实增强混凝土, 属于超高性能混凝土的一种。其优点是具有超高抗压强度、高弹模、高韧性和优良的抗震、抗冲击性能以及耐久性等, 由此, CRC 目前广泛应用于土木工程、军事领域、海上工程等领域^[1-9]。

CRC 是由水泥基体材料加上大掺量细短钢纤维组成, 与目前研究和应用广泛的 RPC(Reactive Power Concrete)的区别是钢纤维掺量通常在 3%~6%之间, 纤维长度为 6 mm 左右, 直径 ≤ 0.2 mm。而后者是由中等长度钢纤维与基体组成, 钢纤维长度一般为 13 mm, 体积掺量不大于 2%。目

收稿日期: 2021-11-17

修改稿日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968058), 内蒙古科技大学建筑科学研究所开放基金项目(JYSJJ-2021M01)

第一作者: 高春彦(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事组合结构及结构抗震性能研究。E-mail: gao-197844@163.com

通信作者: 樊 荣(1997—), 女, 硕士, 主要从事组合结构性能研究。E-mail: 1461523125@qq.com

前国内仅梁兴文教授的团队对 CRC 材料的基本力学性能、CRC 混凝土梁的受弯及受剪性能进行了研究,取得了一定的研究成果^[10-14]。由于 CRC 与高强混凝土相似,在高应力下会呈现爆裂式脆性破坏,延性较差。若将 CRC 填充至钢管形成钢管 CRC 柱,可以大大增强核心 CRC 的延性,这就使得这种构件用于超高层建筑的底部或重要建筑物的关键部位成为可能。目前,国内外学者对钢管 CRC 柱的研究鲜见于报端,但 Wang^[15]、Portolés^[16]、颜燕祥^[17]、王杨^[18]、戎芹^[19]、罗华等^[20]等对钢管 RPC 柱的破坏机理、承载能力、应力-应变全曲线方程以及影响构件力学性能的控制指标和参数等取得了一些重要的研究结论,为钢管约束 CRC 轴压力学性能的研究奠定了理论和试验基础。

本文拟对 18 根方钢管约束 CRC 棱柱体试件进行轴压试验,分析变化参数(钢纤维体积掺量、套箍系数)对轴压短柱的破坏形态、承载力以及变形的影响,同时制作了 6 根非约束 CRC 对比试件,

研究方钢管约束 CRC 试件的荷载-变形关系以及钢管横向变形系数的发展规律,以期为研究钢管约束 CRC 的轴压力学性能提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

采用 42.5R 普通硅酸盐水泥;硅灰中 SiO₂ 含量为 94%;采用白色石英砂,粒径分别为:10~20 目、20~40 目、40~70 目、70~120 目、325 目;钢纤维采用镀铜微丝钢纤维,直径 0.205 mm,长度 6.7 mm,抗拉强度为 2 876 MPa,长径比为 33;采用聚羧酸系减水剂。CRC 立方体试块边长为 100 mm,棱柱体试件尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm;不同钢纤维体积掺量的核心 CRC 采用了不同的配合比,CRC 的配合比以及基本力学性能见表 1。

钢管边长为 100 mm,分别由壁厚为 10 mm、12 mm、14 mm、高度为 300 mm 的钢板拼焊而成。钢材物理力学特性见表 2。

表 1 CRC 设计配合比和基本力学性能

Tab. 1 CRC design mix proportion and basic mechanical properties

编号	材料组分/(kg·m ⁻³)						立方体抗压	轴心抗压	弹性模量	泊松比 ν
	水泥	水	硅灰	钢纤维	减水剂	石英砂	强度 f_{cu} /MPa	强度 f_c /MPa	E_c /MPa	
CRC-4	826	236	215	312	26	1 041	118	90.35	41 923	0.216
CRC-5	817	224	213	390	31	1 030	123	95.08	42 360	0.219
CRC-6	809	221	210	468	36	1 019	131	104.58	43 888	0.217

表 2 钢材物理力学特性

Tab. 2 Physical and mechanical properties of steel tube

理论厚度/mm	实际厚度/mm	弹性模量 E_s /GPa	屈服强度 f_y /MPa	极限抗拉强度 f_u /MPa	伸长率/%
10	9.7	197	467	544	28.1
12	11.8	190	440	521	28.7
14	13.9	200	404	566	28.3

1.2 试件设计与制作

共设计制作 3 组 6 根非约束 CRC 试件和 9 组 18 根方钢管约束 CRC 试件,变化参数为套箍系数(直接变化参数为钢管壁厚,分别为 10 mm、12 mm、14 mm)和钢纤维体积掺量(4%,5%,6%)。所有试件边长均为 100 mm,高度均为 300 mm。非约束试件的命名方法以 CRC-4-1 为例,CRC 表示 Compact Reinforced Composite(密实增强混凝土),4 表示钢纤维体积掺量为 4%,1 表示同组第一个试件。方钢管约束试件以 CCRC-4-10-1 为例,CCRC 表示 Confined Compact Reinforced Composite,10 表示方钢管壁厚,其余两个数字的含义与非约束试件相同。

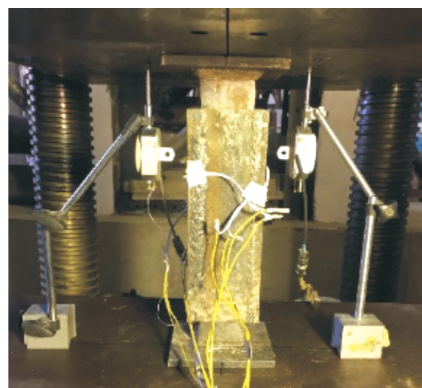
基于试验目的,即钢管仅对核心 CRC 提供侧

向约束作用,因此,浇筑 CRC 前在钢管内壁涂上润滑剂,CRC 浇筑完毕后,用保鲜膜将试件密封,静置 24 h,然后放入标准养护室进行养护。待试件养护成型后,磨平试件上端,将盖板放于试件上端进行焊封,试件制作完成。

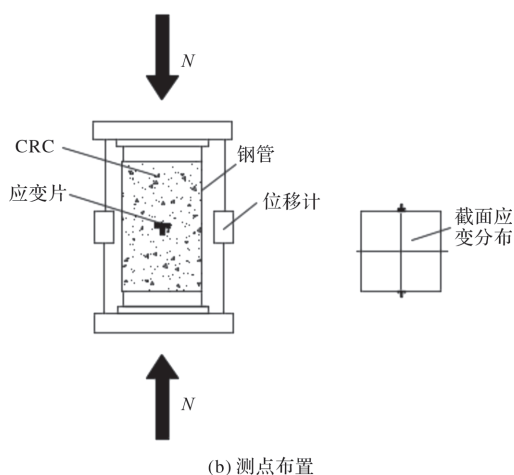
1.3 试验装置与测点布置

本试验在内蒙古科技大学土木工程安全与耐久重点实验室 5 000 kN 压力试验机上进行,试验装置如图 1(a)所示。试件采用连续加载的方式,加载速率为 0.2 mm/min,在试件轴向位移达到 50 mm 或承载力下降至 60% 时停止加载。设计了小于钢管内径壁厚的钢垫块,实验时直接将荷载通过钢垫块施加到核心混凝土上,垫块边长分别为 78 mm、74 mm 和 70 mm。应变片和位移计布

置如图 1(b)所示,在试件中部按间隔 180° 两个对称面布置相互垂直的纵向及横向应变片,试件左右两侧布置 2 个最大量程为 500 mm,精度为 0.01 mm 的位移计,以测量试件的应变发展规律和整体变形情况。



(a) 试验装置



(b) 测点布置

图 1 试验装置及测点布置图

Fig. 1 Test setup and measuring point arrangement

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程与形态

非约束 CRC 试件的破坏过程基本相同。加载初期试件外形并无明显变化,随着荷载的增加,伴随着少量混凝土碎渣掉落,试件表面出现若干细微裂缝;当荷载增加至某一值时,试件突然碎裂,

同时发出“嘭”的巨大声响,出现一条或者多条斜向裂缝贯穿试件表面,试件典型破坏形态如图 2 所示,为沿斜截面的剪切滑移破坏。

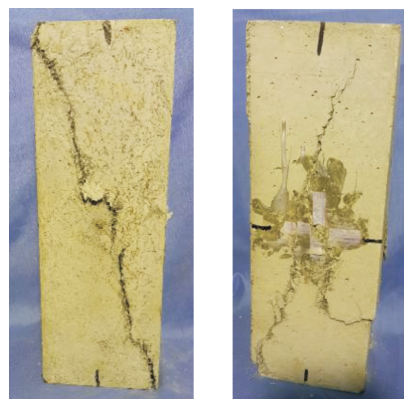
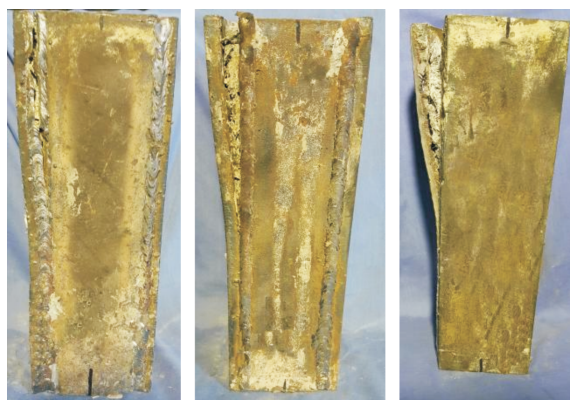


图 2 非约束 CRC 试件破坏形态

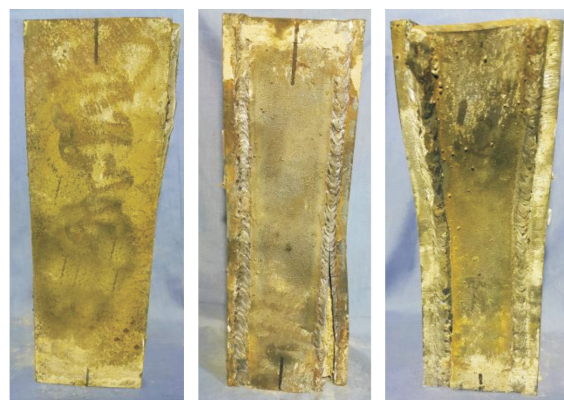
Fig. 2 Failure modes of unconfined CRC specimens

不同参数方钢管约束 CRC 试件的破坏过程也基本相同,由于核心 CRC 的高弹模特性,在达到峰值荷载的 85% 之前,试件外形没有明显变化,在此阶段荷载-变形关系呈直线变化,试件处于弹性受力阶段。当超过峰值荷载后,绝大多数试件基本在中部以上钢管焊缝被撕裂,在焊缝撕裂范围内核心 CRC 被压碎。这是由于轴向压力仅施加在钢管内的 CRC 上,CRC 在纵向受压的同时,横向膨胀并挤压钢管,而由于钢管的焊接质量问题,最终导致出现不同程度的焊缝撕裂破坏。图 3(a)、(b)、(c)为 9 组方钢管约束 CRC 试件的破坏形态。图 3(d)给出试件 CCRC-4-12 在钢管剥离后核心 CRC 的破坏形态。可以发现,核心 CRC 的破坏主要发生在钢管焊缝撕裂范围内,除了不规则的压碎开裂,主裂缝仍为沿斜截面的剪切滑移裂缝,说明尽管核心 CRC 受到钢管的约束,间接提高了其抗剪强度,但抗剪强度仍远远低于约束 CRC 的抗压强度,故发生沿斜截面的剪切滑移破坏。

由试验过程可知,随着钢纤维掺量和套箍系数的增加,试件的破坏形态没有明显变化。



(a) CCRC-4



(b) CCRC-5

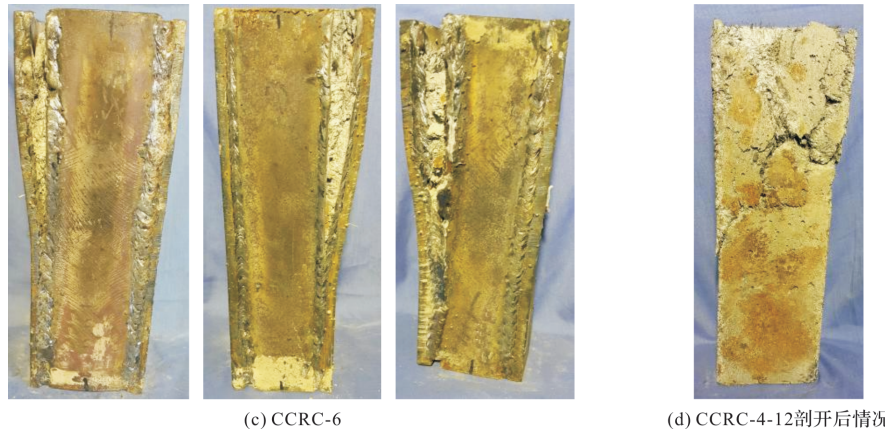


图 3 方钢管约束 CRC 试件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of square steel tube confined CRC specimens

2.2 荷载-变形关系

图 4 所示为试件的荷载-纵向变形曲线, 图 5 所示为试件的荷载-钢管横向变形系数 $U(\epsilon_h/\epsilon_v)$ 曲线. 图 5 中实心圆点表示钢管屈服时的位置. 由于本文试验试件的套箍系数 ξ 均较大, 各试件在加载时不存在明显的峰值荷载点, 当变形 $\Delta > 5 \text{ mm}$ 之后, 试件的荷载会趋于稳定. 鉴于此, 取轴向荷载-纵向变形曲线 $\Delta = 4 \sim 5 \text{ mm}$ 左右对应的荷载作

为方钢管约束 CRC 的受压极限荷载^[10].

由图 4 可知, 试件的轴向荷载-纵向变形曲线基在峰值荷载的 85% 之前呈线性变化. 在该阶段钢管泊松比在 0.49~0.64 之间(图 5), 呈现出近乎垂直的直线, 且钢管泊松比大于钢管单轴受力时的泊松比, 说明从加载开始方钢管就对其内部 CRC 产生了约束作用. 钢管屈服后, 试件由弹性阶段进入弹塑性阶段, 此时随荷载的增加 U 值增长的速度加快(图 5).

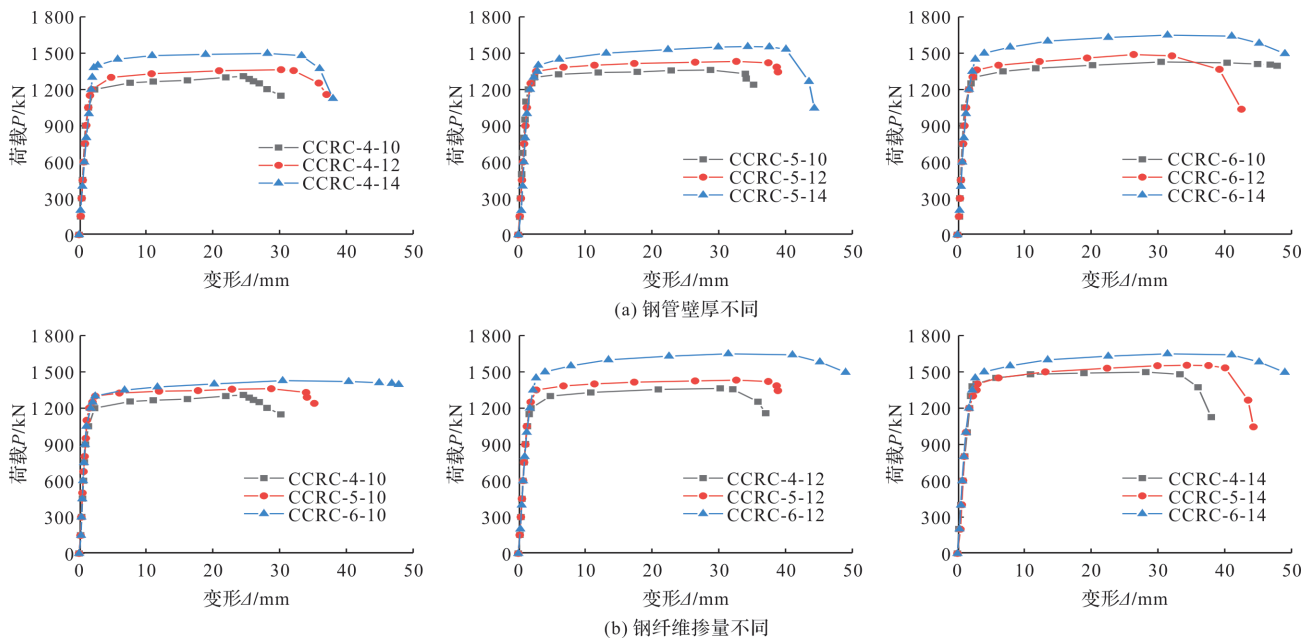
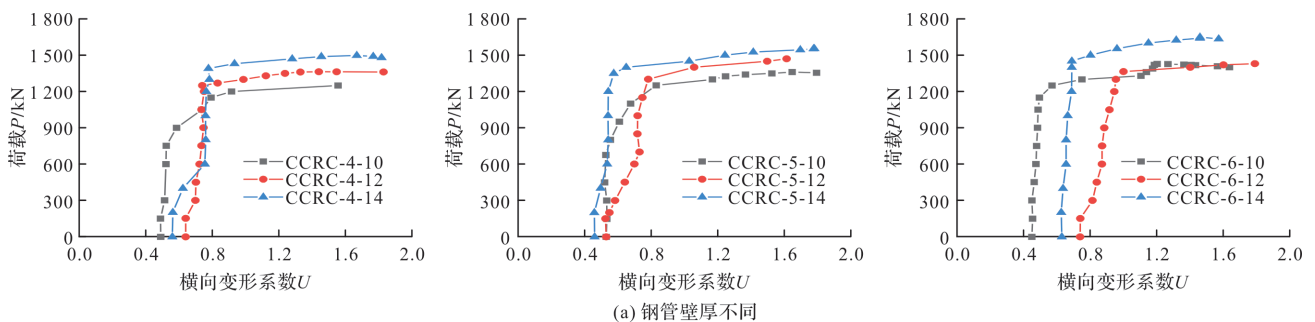


图 4 轴向荷载-纵向变形曲线

Fig. 4 Axial Load -longitudinal deformation curves



(a) 钢管壁厚不同

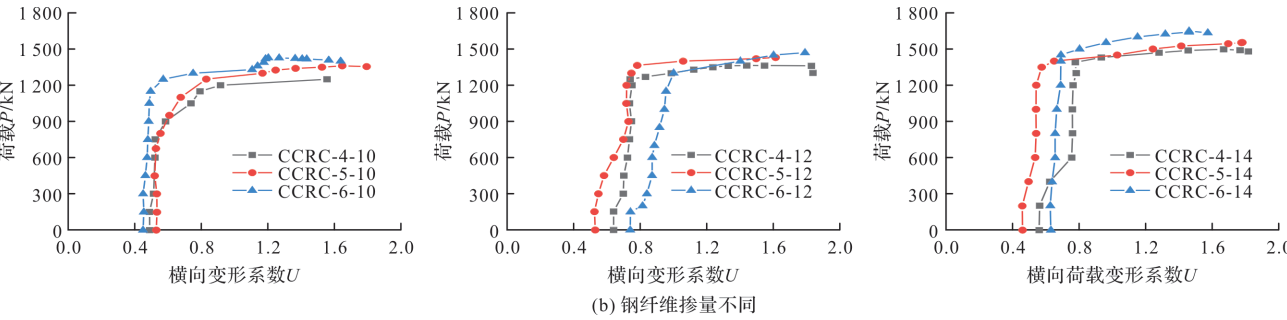


图 5 轴向荷载-横向变形系数曲线

Fig. 5 Load-transverse deformation coefficient curves

加载至峰值荷载后, 核心 CRC 内部微裂缝逐渐发展, 但由于试件套箍系数较大, 在钢管约束下变形增大的同时荷载没有下降, 此时轴向荷载基本不增加而钢管的横向变形系数 U 持续增加, 当 $U > 1$ 时, 钢管中以环向拉应力为主, 对核心 CRC 的约束更大。

3 试件的特征点参数

表 3 给出所有试件的主要特征点参数。其中, ξ 为套箍系数, $\xi = f_y A_s / f_c A_c$, 式中: f_y 、 f_c 分别为钢管屈服强度和约束 CRC 的抗压强度; A_s 、 A_c 分别为钢管和核心 CRC 的截面面积; ϵ_p 为无约束 CRC 的峰值应变; P_u 为试件的轴压极限荷载; σ_0 、 ϵ_0 分别为方钢管约束 CRC 试件的峰值应力及对应的峰值应变。

由表 3 可知, 钢纤维体积掺量为 4% 时, 套箍系数增加时, σ_0 分别提高了 17% 和 45%, ϵ_0 分别

提高了 15% 和 26%; 钢纤维体积掺量为 5% 时, σ_0 分别提高了 15% 和 34%, ϵ_0 分别提高了 18% 和 31%; 钢纤维体积掺量为 6% 时, σ_0 分别提高了 15% 和 40%, ϵ_0 分别提高了 19% 和 26%。钢管厚度为 10 mm 时, 钢纤维体积掺量增加时, σ_0 分别提高了 9% 和 10%, ϵ_0 分别提高了 4% 和 3%; 钢管厚度为 12 mm 时, σ_0 分别提高了 7% 和 8%, ϵ_0 均提高了 6%; 钢管厚度为 14 mm 时, σ_0 分别提高了 1% 和 6%, ϵ_0 分别提高了 8% 和 3%。钢纤维体积掺量为 4%、5% 和 6% 的约束 CRC 的 σ_0 较非约束 CRC 平均增大了 1.44 倍, ϵ_0 增大了 2.1 倍。由此可知, CRC 在方钢管约束下, 脆性得到了改善, 试件的承载能力和变形能力显著提高。钢纤维体积掺量和套箍系数的增大都会使方钢管约束 CRC 的峰值应力和峰值应变有一定程度的提高, 其中套箍系数对方钢管约束 CRC 的影响最显著。

表 3 试件的主要特征点参数

Tab. 3 Main characteristic parameters of specimens

试件编号	ξ	f_c /MPa	平均值 /MPa	$\epsilon_p / \mu\epsilon$	P_u /kN	σ_0 /MPa	平均值 /MPa	$\epsilon_0 / \mu\epsilon$	平均值 /MPa	σ_0 / f_c	ϵ_0 / ϵ_p
CRC-4-1	0	88.8	90.3	2 832	888	88.8	90.3	2 832	2 875	1	1
CRC-4-2		91.8		2 918	918	91.8		2 918			
CRC-5-1	0	92.8	95.1	2 973	928	92.8	95.1	2 973	3 099	1	1
CRC-5-2		97.4		3 225	974	97.4		3 225			
CRC-6-1	0	106.3	104.6	3 245	1 063	106.3	104.6	3 245	3 201	1	1
CRC-6-2		102.9		3 157	1 029	102.9		3 157			
CCRC-4-10-1	2.90	90.3	90.3	2 875	1 191	186.1	187.8	7 803	7 855	2.08	2.73
CCRC-4-10-2		90.3			1 213	189.5		7 907			
CCRC-4-12-1	3.56	90.3	90.3	2 875	1 285	222.5	220.6	9 103	9 069	2.44	3.15
CCRC-4-12-2		90.3			1 263	218.7		9 035			
CCRC-4-14-1	4.16	90.3	90.3	2 875	1 432	276.2	272.4	9 965	9 904	3.02	3.44
CCRC-4-14-2		90.3			1 392	268.5		9 843			
CCRC-5-10-1	2.75	95.1	95.1	3 099	1 329	207.7	204.4	8 176	8 135	2.15	2.63
CCRC-5-10-2		95.1			1 287	201.1		8 094			
CCRC-5-12-1	3.38	95.1	95.1	3 099	1 379	238.7	235.6	9 682	9 643	2.48	3.11
CCRC-5-12-2		95.1			1 343	232.5		9 604			

续表 3

试件编号	ξ	f_c /MPa	平均值 /MPa	$\epsilon_p/\mu\epsilon$	P_u/kN	σ_0 /MPa	平均值 /MPa	$\epsilon_0/\mu\epsilon$	平均值 /MPa	σ_0/f_c	ϵ_0/ϵ_p
CCRC-5-14-1	3.95	95.1	95.1	3 099	1 395	269.1	274.7	10 598	10 690	2.89	3.45
CCRC-5-14-2		95.1			1 453	280.3		10 782			
CCRC-6-10-1	2.50	104.6	104.6	3 201	1 338	209.1	207.0	8 123	8 077	1.98	2.52
CCRC-6-10-2		104.6			1 312	205.0		8 031			
CCRC-6-12-1	3.07	104.6	104.6	3 201	1 411	244.3	237.7	9 674	9 603	2.27	3
CCRC-6-12-2		104.6			1 335	231.1		9 532			
CCRC-6-14-1	3.59	104.6	104.6	3 201	1 523	293.8	290.1	10 276	10 216	2.77	3.19
CCRC-6-14-2		104.6			1 485	286.5		10 156			

4 方钢管约束 CRC 本构模型

基于韩林海提出的本构模型^[21], 综合上述试件的特征点参数, 得到方钢管约束 CRC 轴向应力-应变关系表达式, 即

$$\begin{cases} y = Ax - Bx^2 & x \leq 1 \\ y = \frac{x}{\beta(x-1)^\eta + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $y = \sigma/\sigma_0$ 、 $x = \epsilon/\epsilon_0$. 结合试验数据, 拟合得到的 A 、 B 、 β 、 η 值见表 4.

表 4 本构模型中各参数的取值

Tab. 4 Parameters values in constitutive model

试验编号	套箍系数 ξ	A	B	β	η
CCRC-4-10	2.90	2.05	1.14	-0.157	1.379
CCRC-4-12	3.56	2.03	1.12	-0.068	1.432
CCRC-4-14	4.16	1.92	1.02	-0.066	1.465
CCRC-5-10	2.75	2.06	1.25	-0.044	1.363
CCRC-5-12	3.38	2.03	1.24	-0.068	1.419
CCRC-5-14	3.95	1.98	1.01	-0.067	1.455
CCRC-6-10	2.50	2.05	1.19	-0.052	1.332
CCRC-6-12	3.07	2.06	1.23	-0.068	1.395
CCRC-6-14	3.59	1.96	1.02	-0.068	1.434

由表中数据发现, A 、 B 是近似等于 2.016 和 1.135 的曲线上段修正系数, 如图 6 所示.

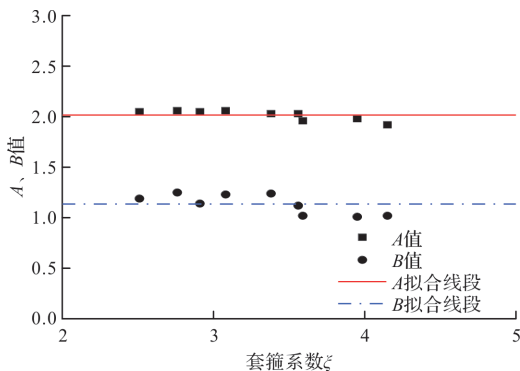


图 6 A 、 B 值与 ξ 的关系

Fig. 6 Relationship between A , B and ξ

β 、 η 是与试件套箍系数 ξ 相关的曲线下段修正系数. β 与 ξ 间的关系如图 7 所示.

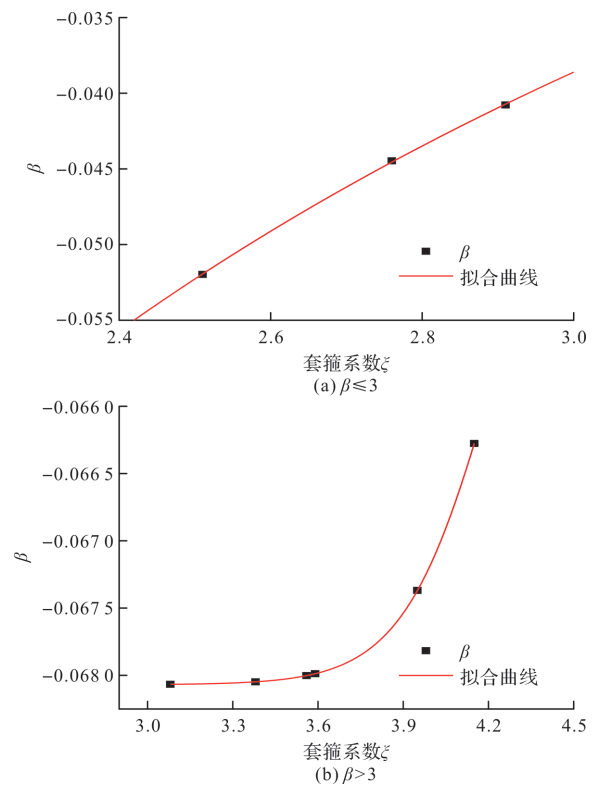


图 7 β 与 ξ 的关系

Fig. 7 Relationship between β and ξ

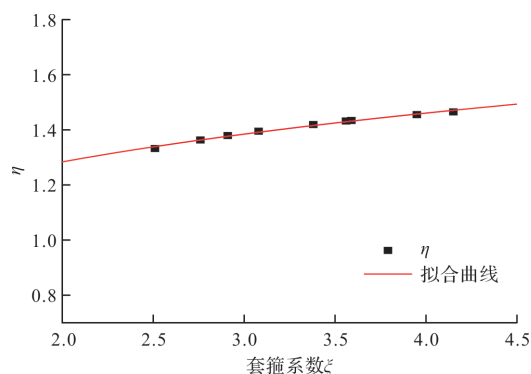
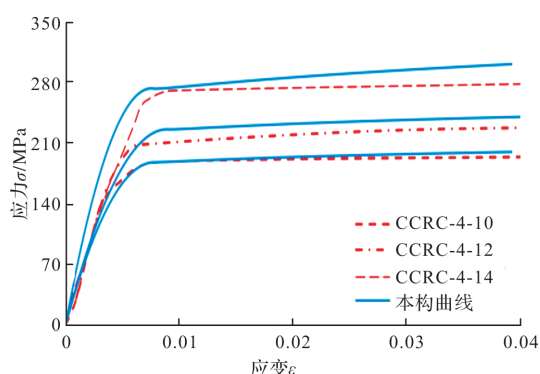
通过拟合得到 β 与 ξ 之间的关系式:

$$\begin{cases} \beta = 0.03 - 0.205/\xi, & \xi \leq 3 \\ \beta = -0.0635 - \frac{4.56 \times 10^{-3}}{1 + e^{\frac{\xi - 4.218}{0.157}}}, & \xi > 3 \end{cases} \quad (2)$$

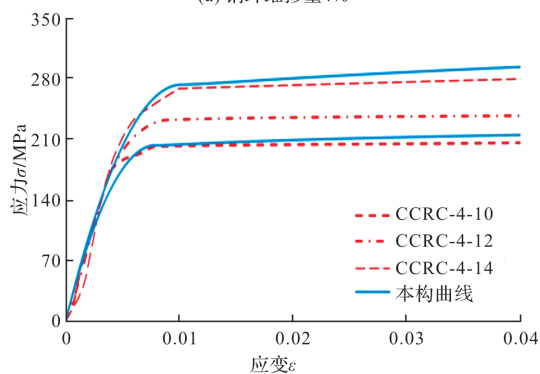
采用同样的方法得到 η 与 ξ 间的关系如图 8 所示. 通过拟合得到 η 与套箍系数 ξ 的关系式为

$$\eta = 1.128 + 0.186/\xi \quad (3)$$

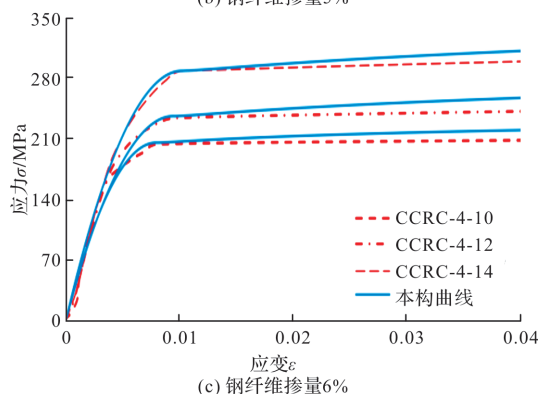
方钢管约束 CRC 本构模型计算曲线与试验曲线对比结果如图 13 所示. 由图可以看出, 模型计算曲线与试验曲线吻合较好, 可以有效反映在钢纤维体积掺量为 4%~6%, 套箍系数为 2.5~4.2 范围内, 方钢管约束 CRC 的应力-应变曲线的特征及规律.

图 8 η 与 ξ 的关系Fig. 8 Relationship between η and ξ 

(a) 钢纤维掺量4%



(b) 钢纤维掺量5%



(c) 钢纤维掺量6%

图 9 本构模型曲线与试验曲线对比

Fig. 9 Comparison between constitutive model curves and test curves

5 结论

(1) 方钢管约束 CRC 棱柱体短柱的典型破坏

形态为钢管焊缝撕裂破坏, 焊缝撕裂范围内核心 CRC 被压碎; 钢管剥离后核心 CRC 的破坏形态为沿斜截面剪切滑移破坏;

(2) 由于试验试件的套箍系数较大, 方钢管约束 CRC 轴压短柱的荷载—变形曲线没有明显的下降段, 在峰值荷载的 85% 以前, 试件基本处于弹性阶段, 钢管屈服后横向变形系数 U 随荷载的增加逐渐呈水平向发展, 钢管对核心 CRC 的约束不断增强;

(3) 套箍系数的变化对试件轴压力学性能的影响最为显著, 使核心 CRC 轴压强度最大提高了 45%, 纵向变形最大提高了 31%. 相比较而言, 钢纤维体积掺量对核心 CRC 的轴压强度和纵向变形影响较小, 分别最大提高了 10% 和 8%;

(4) 建立了方钢管约束 CRC 轴心受压应力—应变本构关系模型, 计算结果与试验结果吻合较好.

参考文献 References

- [1] HENRIK B. H. Compact reinforced composite; US4979992 A[P]. 1988-02-09.
- [2] AARUP B, WEISS J, KOVLER K, et al. CRC-a special fibre reinforced high performance concrete [C]// International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Northwestern, Evanston, Illinois: APA, 2004.
- [3] RAHMAN S, MOLYNEAUX T, PATNAIKUNI I. Ultra high performance concrete: recent applications and research[J]. Australian Journal of Civil Engineering, 2005, 2:13-20.
- [4] KAPTIJN N, BLOM J. A new bridge deck for the kaag bridges the first crc (compact reinforced composite) application in civil infrastructure[J]. Science & Engineering of Composite Materials, 2002, 10 (6): 397-402.
- [5] GU C P, YE G, SUN W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives[J]. Science China: Technological Sciences, 2015 (4): 587-599.
- [6] WANG W, WU C, LI J, et al. Behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) filled steel tubular members under lateral impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 132(OCT.):1-24.
- [7] XU S, WU C, LIU Z, et al. Experimental investigation on the cyclic behaviors of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete filled thin-walled steel

- tubular columns[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 140(JUL.): 1-20.
- [8] WU H, REN G M, FANG Q, et al. Response of ultra-high performance cementitious composites filled steel tube (UHPCC-FST) subjected to low-velocity impact [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144 (Nov.): 106341.1-106341.14.
- [9] 邵旭东,邱明红. 基于UHPC材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 160-167.
SHAO Xudong, QIU Yongming. Research on high performance fabricated bridge structures based on UHPC[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science), 2019, 51(2): 160-167.
- [10] 胡翱翔,梁兴文,于婧,等. 超高性能混凝土轴心受拉力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 30-37.
HU Aoxiang, LIANG Xingwen, YU Jing, et al. Experimental study on axial tensile mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2018, 45(9): 30-37.
- [11] HU Aoxiang, YU Jing, LIANG Xingwen, et al. Tensile characteristics of ultra-high-performance concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 70(5/6): 314-324.
- [12] 胡翱翔,梁兴文,史庆轩,等. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 534-544, 610.
HU Aoxiang, LIANG Xingwen, SHI Qingxun, et al. Bond characteristics between high strength bars and ultra-high performance concrete[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science), 2021, 53(4): 534-544, 610.
- [13] 梁兴文,汪萍,徐明雪,等. 配筋超高性能混凝土梁受弯性能及承载力研究[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 110-119.
LIANG Xingwen, WANG Ping, XU Mingxue, et al. Study on flexural behavior and bearing capacity of reinforced ultra-high performance concrete beams[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 110-119.
- [14] 梁兴文,王照耀,于婧,等. 超高性能混凝土有腹筋梁受剪性能及受剪承载力研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(10): 56-67.
LIANG Xingwen, WANG Zhaoyao, YU Jing et al. Study on shear performance and shear bearing capacity of ultra-high performance concrete beams with web reinforcement [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(10): 56-67.
- [15] WANG Y B, Richard Liew J Y. Constitutive model for confined ultra-high strength concrete in steel tube [J]. Construction & Building Materials, 2016, 126 (NOV. 15): 812-822.
- [16] Portolés J M, SERRA E, ROMERO M L. Influence of ultra-high strength infill in slender concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 86(jul.): 107-114.
- [17] 颜燕祥,徐礼华,蔡恒,等. 高强方钢管超高性能混凝土短柱轴压承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 128-137.
YAN Yanxiang, XU Lihua, CAI Heng, et al. Research on the calculation method of axial compression bearing capacity of ultra-high performance concrete filled square steel tubular short columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 128-137.
- [18] 王杨. 钢管约束活性粉末混凝土短柱轴压性能及承载力计算研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
WANG Yang. Research on axial compression performance and bearing capacity of steel tube confined reactive powder concrete short columns [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2018.
- [19] 戎芹,曾宇声,侯晓萌,等. 圆钢管钢纤维活性粉末混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 247-253.
RONG Qin, ZENG Yusheng, HOU Xiaomeng et al. Experimental study on axial compression performance of steel fiber reinforced reactive powder concrete circular steel tubular short columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 247-253.
- [20] 罗华. 钢管活性粉末混凝土柱受压性能试验与理论研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015: 56-71.
LUO Hua. Experimental and theoretical study on compressive behavior of reactive powder concrete filled steel tubular columns [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 56-71.
- [21] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 北京: 北京科学出版社, 2016.
HAN Linhai. Concrete-filled steel tube structure-theory and practice [M]. Beijing: Beijing Science Press, 2016.

(编辑 沈 波)