文章编号:1005-0523(2022)05-0001-09

SRPE套管约束RC柱偏压力学性能试验研究

段红伟[1],高剑平[1,2],邹恒之[1],曹忠民[1,2],刘 洪[3]

(1. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学土木工程国家级试验教学示范中心,江西 南昌 330013; 3. 安源管道实业股份有限公司,江西 萍乡 337000)

摘要:针对西部强盐渍土/盐湖地区的钢筋混凝土(RC)桥梁墩柱的严重腐蚀问题,提出新型材料组合结构"钢骨架聚乙烯塑料复合管(SRPE)约束RC柱",为研究其偏心受压力学性能,进行了8根SRPE套管约束钢筋混凝土柱和4根无套管约束对比柱的偏压试验,获得了试件破坏形态和荷载-轴向位移曲线,进而分析了SRPE套管压力等级、偏心距、长细比等设计参数对试件偏心受压力学性能的影响规律,并给出了偏压承载力计算公式,供工程应用参考。研究结果表明:SRPE套管对钢筋混凝土偏压柱的极限承载力和延性有显著提升;SRPE套管压力等级越高,试件承载力的提高效果越好,但对延性的影响不明显;试件的极限承载力随着偏心距和长细比的增加而减小;试件的延性随着长细比的增大而降低;对比试件的柱中峰值挠度要远小于SRPE套管试件的柱中峰值挠度,且偏心距和长细比越大,试件的柱中峰值挠度越大;达到极限荷载时,各偏压试件的侧向挠度曲线接近于正弦半波曲线。

关键词:钢骨架聚乙烯塑料复合管;套管柱;偏心受压;极限承载力;延性;侧向挠度

中图分类号:TU398;[U24] **文献标志码**:A

本文引用格式:段红伟,高剑平,邹恒之,等. SRPE套管约束RC柱偏压力学性能试验研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(5):1-9.

Experimental Research on the Mechanical Properties of SRPE Pipe Confined Reinforced Concrete Circular Columns Subjected to Eccentric Compression

Duan Hongwei[1], Gao Jianping[1,2], Zou Hengzhi[1], Cao Zhongmin[1,2], Liu Hong[3]

(1. School of Civil Engineering and Architectare, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Anyuan Pipelines Industrial Co., Ltd., Pingxiang 337000, China)

Abstract: Reinforced concrete(RC) bridge piers and columns located in strong saline soil and salt lake area in western China are suffering from corrosion attack, so a new type of composite column is proposed,which is herein referred to as steel reinforced polyethylene plastic pipe(SRPE) confined reinforced concrete column. Eight SRPE confined reinforced concrete columns and four unconfined control columns subjected to eccentric load were tested to study their mechanical properties.The failure pattern and load-axial displacement curves of specimens were obtained. The influence of design parameters such as pressure level of SRPE pipe, eccentricity and slenderness ratio on the mechanical properties of specimens was analyzed. The calculation formula of ultimate bearing ca-

收稿日期:2022-01-09
基金项目:国家自然科学基金项目(52268025)

pacity of SRPE pipe confined reinforced concrete columns subjected to eccentric load is also proposed for the actual application reference. The experimental results show that the ultimate bearing capacity and ductility of the RC columns under eccentric load are significantly improved for the confinement by SRPE pipe; The bearing capacity increases with the increase of pressure level of SRPE pipe, but the ductility is improved little. The bearing capacity decreases with the increase of eccentricity and slenderness ratio. The ductility of specimens decreases with the increase of slenderness ratio; The lateral peak deflection in the middle height of column confined by SRPE pipe is much larger than that of the control specimens, which increases with the increase of eccentricity and slenderness ratio; The lateral deflection corresponding to ultimate load is close to sine half-wave curve.

Key words: steel frame polyethylene plastic composite pipe; tubed column; eccentric compression; ultimate bearing capacity; ductility; lateral deflection

Citation format: DUAN H W, GAO J P, ZOU H Z, et al. Experimental research on the mechanical properties of SRPE pipe confined reinforced concrete circular columns subjected to eccentric compression[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5): 1-9.

在西部的强盐碱地带,钢筋混凝土结构腐蚀十分严重,被迫反复修复或重建,经济损失巨大[1-2]。桥墩柱作为桥梁的主要竖向承重和抗侧力构件,其耐久性将会直接影响桥梁的使用安全和寿命。基于上述背景,本文作者提出新型材料组合结构"SRPE套管约束RC柱"。如图1所示,SRPE管是由连续缠绕焊接成型的钢丝网骨架与高密度聚乙烯(HDPE)塑料基体共挤成型的复合管[3-4],有效阻断外界各种腐蚀性离子对桥墩柱的侵蚀的同时,还可以较好地约束核心混凝土,提高墩柱的受力性能。

需要指出的是,涂塑钢管界面易发生分离,PVC管不耐老化,低温容易变脆,多数FRP的树脂基体耐腐蚀却不耐光和高温(60 ℃开始软化)[5-6],HDPE管耐腐蚀但存在不耐压、应力松弛、热胀冷缩、蠕变[7-8]等缺点。相比之下,SRPE管可阻隔各类腐蚀性离子的侵蚀、耐紫外线、耐温性强(-40~80 ℃),使用寿命达50~70 a,更能适应西部强盐渍土/盐湖区的恶劣环境。本文在SRPE套管约束混凝土柱/钢筋混凝土柱轴压力学性能研究[9-12]的基础上,进行偏心受压力学性能试验研究,为该新型组合柱研究的进一步完善和工程应用提供参考。

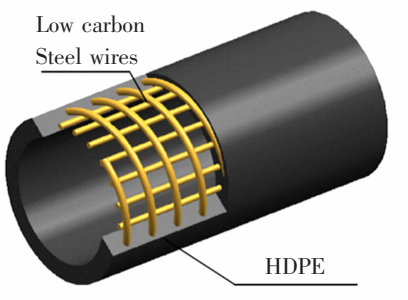


图1 SRPE管结构
Fig.1 The structure of SRPE tubes

1 试验概况

1.1 材料力学性能试验

本次试验所用的SRPE套管由江西省萍乡市安源管道实业股份有限公司生产提供,表1、表2为本次试验材料的基本力学性能参数。表1中μ_h为HDPE的泊松比,E_{sh}为弹性模量,f_{yh}为弹性极限,f_{uh}为拉伸强度;表2中d为钢丝的直径,f_{ys}为钢丝的屈服强度,f_{us}为极限强度,δ为伸长率,E_{st}为弹性模量。

表1 HDPE材料力学性能
Tab.1 Mechanical properties of HDPE

Material	μ_h	E_{sh} / MPa	f_{yh} / MPa	f_{uh} / MPa
HDPE	0.529	1 390.98	6.23	19.89

表 2　钢丝基本力学性能
Tab.2　Basic mechanical properties of steel wire

d/mm	f_{ys}/MPa	f_{us}/MPa	δ/%	E_{st}/GPa
2.52	615.9	700.9	4.8	208
2.99	604.8	677.2	4.3	200

1.2　试验设计

本次试验共设计 8 根 SRPE 套管约束钢筋混凝土柱和 4 根无套管钢筋混凝土柱（对比试件),RC 柱均为直径 200 mm 的圆柱。混凝土强度等级为 C30;纵筋等级为 HRB400,直径为 12 mm;箍筋为直径 4 mm 的碳素钢丝，箍筋间距为 60 mm;SRPE 管压力等级采用 1.6 MPa 和 2.5 MPa 2 种;偏心距(e_0)为 20 mm 和 40 mm;长细比为 6 和 9。试件具体设计参数见表 3。试件编号中,S 表示 SRPE 套管试件,RC 表示无套管对比试件,S1 表示 SRPE 套管压力等级为 1.6 MPa,S2 表示 SRPE 套管压力等级为 2.5 MPa,20和 40 依次表示偏心距 20 mm 和 40 mm,600 和 900依次表示试件长度 600 mm 和 900 mm;峰值挠度为偏压试件达到极限承载力时所对应的柱中挠度。

1.3　测量和加载

试验在 NYL-500 t 压力试验机上进行,试件两端安装刀口铰模拟偏压加载。3 个百分表依次布置在远离轴向力一侧的柱中和上下两端距离柱中 150 mm 位置处，机电位移计分别对称布置在试件两侧,布置如图 2 所示。加载前,先调整试件上下截面形心的连线,使其通过压力机上、下承压板的几何中心,调整好进行偏压预加载,所加荷载约为预估承载力的 20%,测试加载设备、仪表和数据采集系统是否正常工作,之后再进行正式加载。正式加载时参照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)的相关规定,采用单调逐级加载,每级荷载约为试件预估极限承载力的 1/15,在读数接近预估极限承载力 80%~90%时，荷载分级进行适当调密,直至试件变形很大或荷载下降至峰值荷载 60%附近停止加载。加载过程中记录各试件的破坏过程和破坏特征。图 2 中 LVDT 为差动式位移传感器。

表 3　试验设计参数和试验结果
Tab.3　Experimental design parameters and measured results

Specimen number	e_0/mm	Slenderness ratio	Pressure grade of SRPE pipe /MPa	Ultimate bearing capacity /kN	Peak axial displacement /mm	Peak deflection /mm
S1-20-600	20	6	1.6	1 754.430	15.092	12.740
S1-40-600	40	6	1.6	1 605.886	21.703	15.542
S2-20-600	20	6	2.5	2 356.109	20.629	13.339
S2-40-600	40	6	2.5	1 895.269	25.421	15.869
S1-20-900	20	9	1.6	1 712.818	17.927	13.850
S1-40-900	40	9	1.6	1 530.645	22.807	16.421
S2-20-900	20	9	2.5	2 215.195	19.707	14.719
S2-40-900	40	9	2.5	1 737.179	26.092	17.340
RC-20-600	20	6	–	902.090	5.663	2.219
RC-40-600	40	6	–	764.840	6.206	2.451
RC-20-900	20	9	–	884.300	6.044	2.931
RC-40-900	40	9	–	749.761	6.632	3.309

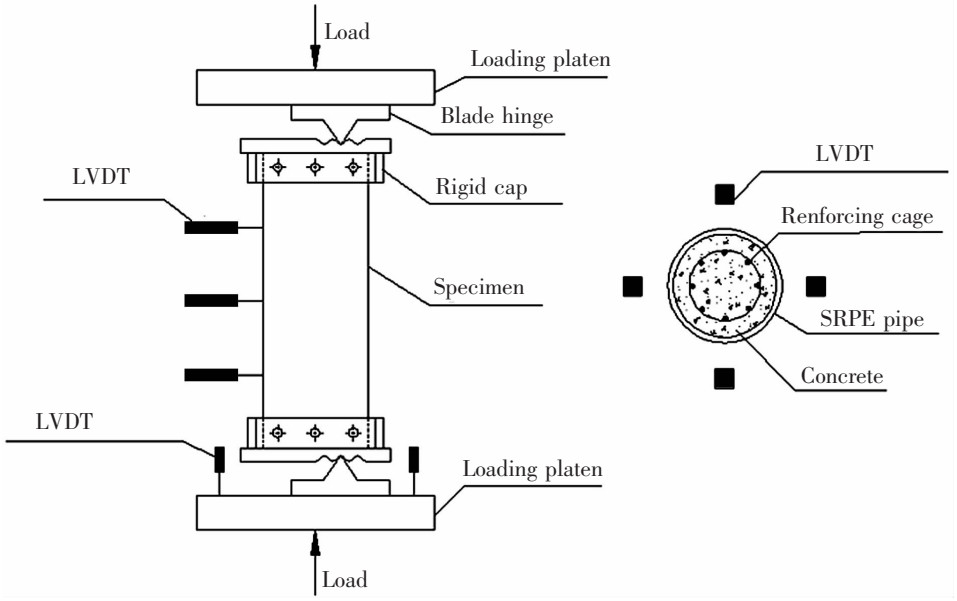


图2 试验装置和测点布置

Fig.2 Test setup and instrumentation

2 主要试验结果

2.1 试验现象及破坏形态

大、小偏压试件的破坏过程大体相似。加载初期,试件侧向挠度增长缓慢,随着荷载增加,挠度增速加快,接近极限荷载时,柱中挠度急剧增长,受压区SRPE套管出现褶皱鼓曲,“嘶嘶”响声更加频繁,达到极限承载力后,柱的挠度持续增长,荷载缓慢下降,表现出较好的延性。以试件S2-40-600和S2-20-600为例分别说明大偏压、小偏压的典型破坏形态,见图3和图4。偏心距为40 mm时试件发生大偏心受压破坏,剥除SRPE套管,焚烧除去基体材料HDPE后,发现核心混凝土柱受压侧混凝土被压碎,受拉侧出现数道横向主裂缝,受压侧纵向钢筋因压曲而发生明显弯折,SRPE套管褶皱部分的内部钢丝网骨架发生明显鼓曲但未断裂;偏心距为20 mm时试件发生小偏心受压破坏,SRPE套管斜向剪切变形明显,核心混凝土的破坏形态呈现明显的斜剪破坏,斜剪变形角约为45°,见图4(b)。纵向钢筋和SRPE管内部钢丝网骨架由于被动抵抗斜向剪切滑移而发生弯折,但未断裂,分别见图4(c)和图4(d),斜剪变形方向以白线示出。



(a) Core concrete (b) Tension side reinforcement (c) Compression side reinforcement (d) Internal wire mesh

图3 大偏压试件的典型破坏形态

Fig.3 Typical failure mode of specimen subjected to compression with large eccentricity



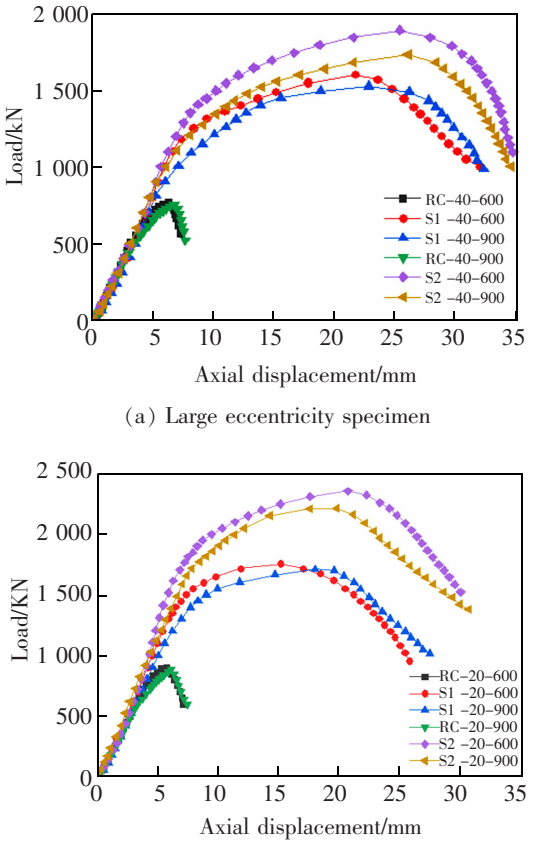
(a) Pipe cutting　(b) Core concrete　(c) Longitudinal reinforcement　(d) Internal wire mesh

图 4　小偏压试件的典型破坏形态

Fig.4　Typical failure mode of specimen subjected to compression with small eccentricity

2.2　荷载–轴向位移曲线

图 5(a)和图 5(b)分别为大、小偏压试件的荷载–轴向位移曲线。从图 5 可以看出,和对比试件相比,SRPE 套管非常显著地提高了偏压试件的承载力和延性。图 5(a)和 5(b)的曲线均可分为线弹性段、弹塑性段和下降段。如图 5(a)所示,在加载初期,由于试件所受荷载较小,SRPE 套管还未对核心混凝土发生约束作用,大偏压试件的轴向位移与荷载近似呈现线性递增关系,且各曲线几乎重合,试件处于线弹性段;当进入弹塑性段时,随着荷载的增加,试件位移曲线开始略微变平缓,切线模量开始变小,相对小偏压试件,此时位移增长更快,峰值位移更大,但提高承载力的幅度低于小偏压试件。SRPE 套管压力等级、长细比等参数基本不影响曲线的走势;当加载超过试件的极限承载力后,曲线缓慢下降,试件表现出良好的延性特征,直至试件破坏。如图 5(b)所示,在加载初期,曲线几乎重合,SRPE 套管小偏压试件的轴向位移与荷载近似呈线性增长关系,因为此时荷载较小,SRPE 套管尚未对核心混凝土发挥约束作用,试件处于线弹性段;随着荷载逐渐增大,各曲线的切线模量开始降低,试件轴向位移增长加快,试件开始进入弹塑性段,因 SRPE 套管压力等级的不同,曲线出现了明显的差别,2.5 MPa 套管的约束效果明显优于 1.6 MPa 套管的约束效果,即对应的峰值荷载和峰值位移更大;当荷载超过试件的极限荷载时,曲线开始缓慢下降,由于 SRPE 套管的约束作用,避免了混凝土的突然压溃,荷载下降速度较慢,试件表现出较好的延性。



(a) Large eccentricity specimen

(b) Small eccentricity specimen

图 5　荷载–轴向位移曲线

Fig.5　Load–axial displacement curve

3　试验结果分析与讨论

3.1　极限承载力和延性分析

为定量分析各控制参数对偏压试件延性的影响规律,引入延性系数 μ,如式(1)所示。各偏压试件

延性系数见表4。

$$\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{1}$$

式中：Δ_y为屈服位移，mm，试件荷载-轴向位移曲线的弹性段延长线与过峰值点的切线交点处的位移，由于该值均位于荷载上升阶段达到70%~80%峰值荷载对应的轴向位移之间。为方便计算，统一取Δ_y=Δ75%。Δ_u为极限位移，mm，试件所承受的荷载下降至峰值荷载的80%时所对应的轴向位移。

表4 偏压试件的延性系数

Tab.4 Ductility coefficient of specimens under eccentric load

Specimen	Δ_y/mm	Δ_u/mm	μ
S1-20-600	5.95	22.27	3.74
S1-20-900	6.78	23.38	3.45
S1-40-600	7.58	27.83	3.67
S1-40-900	9.01	30.23	3.36
S2-20-600	7.15	27.09	3.79
S2-20-900	7.34	25.41	3.46
S2-40-600	8.85	32.88	3.71
S2-40-900	9.43	32.02	3.39
RC-20-600	3.41	6.75	1.98
RC-40-600	3.67	7.09	1.93
RC-20-900	3.68	6.87	1.87
RC-40-900	3.99	7.39	1.85

3.1.1 SRPE套管压力等级对极限承载力和延性的影响

从图5可以看出，SRPE套管能明显提高偏压试件的极限承载力和延性。以S1-20-600、S2-20-600、RC-20-600为例，结合表3数据可知，和对比试件相比，SRPE管压力等级为1.6 MPa的偏压极限承载力提高了94.5%，延性系数是对比试件的1.89倍；SRPE管压力等级为2.5 MPa的偏压试件的极限承载力提高了161.2%，延性系数是对比试件的1.91倍，并且压力等级为2.5 MPa的SRPE套管对偏压试件的承载力提高效果要明显强于1.6 MPa的SRPE套管，原因在于试件达到极限承载力后进入破坏阶段，其核心混凝土内部裂缝加速发展，环向变形急剧增大，SRPE管对核心混凝土构成被动环向约束，即管材压力等级越大，SRPE管提供的被动约束力越大，所以试件的承载力随着SRPE套管压力等级的提高而提高。本次试验中，无论大、小偏心受压，压力等级为1.6 MPa和2.5 MPa的SRPE套管约束钢筋混凝土柱的延性系数比较接近（见表4），仅相差0.01~0.05，说明SRPE管压力等级对试件延性的影响相对较小。

3.1.2 偏心距对极限承载力和延性的影响

由表3可知，同等参数条件下，20 mm偏心距试件的极限承载力都大于40 mm偏心距试件的极限承载力，说明试件的偏心距越大，承载力越小。且随着SRPE管压力等级的增大，偏心距对极限承载力的影响越明显，同等参数条件下，2.5 MPa的SRPE套管试件的大、小偏压试件极限承载力的差距远超于1.6 MPa的SRPE套管试件的。以S2-20-600、S2-40-600和S1-20-600、S1-40-600为例，前者极限承载力相差460.84 kN，后者极限承载力相差148.544 kN。本次试验中，偏心距对试件延性的影响并不明显，前者延性系数相差0.08，后者延性系数相差0.07。

3.1.3 长细比对极限承载力和延性的影响

由表3、表4可知，同等参数条件下，长细比为6的偏压试件的极限承载力和延性系数都要大于长细比为9的偏压试件的极限承载力和延性系数，说明偏压试件极限承载力随着长细比的增大而减小，延性随着长细比的增大而降低，主要因为试件的长细比的增加会导致偏压试件的二阶效应增强，使得SRPE套管对核心混凝土的约束效果降低所致。

3.2 侧向挠度分析

根据本次试验结果绘制出SRPE套管偏压试件达到极限荷载时柱的侧向挠度曲线，如图6所示。其

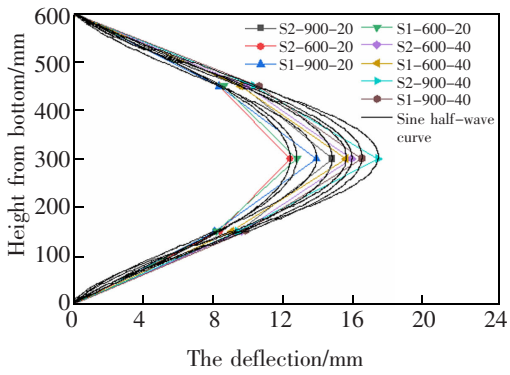


图6 极限荷载时柱的侧向挠度曲线

Fig.6 Lateral deflection curves under ultimate load

中纵坐标为测点距试件底面的高度(依次为 0，150，300，450，600 mm)。各偏压试件峰值挠度见表 3。

从图 6 可以看出，SRPE 套管偏压试件达极限荷载时的侧向挠度曲线接近于正弦半波曲线。SRPE 管压力等级、偏心距、长细比等设计参数对柱的侧向挠度均有不同程度的影响。

3.2.1　SRPE 套管压力等级对柱中挠度的影响

由表 3 可知，SRPE 管钢筋混凝土偏压试件的柱中峰值挠度要远大于对比件的柱中峰值挠度，对比件的柱中峰值挠度在 2.219~3.309 mm，而偏压试件的柱中峰值挠度能够达到 12.74~17.34 mm，因为 SRPE 管较强的环向约束作用，大大提高了核心混凝土的变形能力。同等参数条件下，SRPE 套管压力等级为 2.5 MPa 的偏压试件的柱中峰值挠度和 1.6 MPa 的偏压试件的相差不大，仅 0.327~0.919 mm，说明 SRPE 套管压力等级对柱中挠度的影响相对较小。

3.2.2　偏心距对柱中挠度的影响

由表 3 可知，同等参数条件下，40 mm 偏心距试件的柱中峰值挠度都要大于 20 mm 偏心距试件的柱中峰值挠度，提高幅度为 17.80%~21.99%，说明 SRPE 套管偏压试件柱中挠度随着偏心距的增大而增大。

3.2.3　长细比对柱中挠度的影响

由表 3 可知，同等参数条件下，长细比为 9 的偏压试件的柱中峰值挠度都要大于长细比为 6 的偏压试件的柱中峰值挠度，提高幅度为 5.65%~10.34%，说明长细比越大，偏压试件柱中挠度越大。

4　SRPE 套管约束钢筋混凝土柱偏压承载力计算公式

4.1　基本假定

1）整个试验加载过程中偏压试件始终满足平截面假定；

2）忽略受拉区混凝土的抗拉强度；

3）假定 SRPE 管的环向应力沿壁厚方向均匀分布；

4）本次试验试件的长细比较小，皆为材料破坏，不考虑纵向弯曲的影响。

4.2　计算公式

以 SRPE 套管约束 RC 柱偏压性能试验为基础，参照《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28：2012)，基于经验系数法，提出 SRPE 套管约束 RC 柱偏压承载力计算公式

$$N_u=\varphi\varphi_e N_0 \tag{2}$$

式中：N_u 为 SRPE 套管约束 RC 柱偏压承载力，kN；φ 为偏心受压稳定系数，计算公式见(3)；N_0 为SRPE 套管约束 RC 柱轴压承载力，kN，参照高剑平等[12]提出的轴压计算公式，见式(5)。

$$\varphi=\begin{cases}1 & (L_e/D\leqslant 4)\\ 1-0.0226(L_e/D-4) & (4<L_e/D\leqslant 30)\\ 1-0.1152\sqrt{L_e/D-4} & (L_e/D>30)\end{cases} \tag{3}$$

式中：L_e 为 SRPE 套管柱长度设计值，mm；D 为无套管 RC 柱的圆截面直径，即 200 mm；φ_e 为偏心距的折减系数，计算公式

$$\varphi_e=\begin{cases}\dfrac{1}{1+1.85\dfrac{e_0}{r_c}} & (\dfrac{e_0}{r_c}<1.55)\\ \dfrac{1}{3.92-5.164+\varphi\dfrac{e_0}{0.3r_c}} & (\dfrac{e_0}{r_c}>1.55)\end{cases} \tag{4}$$

式中：e_0 表示初始偏心距，mm；r_c 为无套管 RC 柱的圆截面半径，即 100 mm。

$$N_0=f_y'A_S'+f_{CC}A_{CC} \tag{5}$$

式中：f_y' 为纵筋的抗压强度设计值，MPa；A_S' 为受压钢筋截面面积，mm²；f_{CC} 为 SRPE 套管约束核心混凝土的轴心抗压强度[13-14]，MPa。按式(6)~式(9)计算

$$f_{CC}=f_{C0}(1+1.5\sqrt{\frac{f_l}{f_{C0}}}+2\frac{f_l}{f_{C0}}) \tag{6}$$

$$f_l=f_{l_p}+f_{l_s} \tag{7}$$

$$f_{l_p}=\frac{f_p(k^2-1)}{2k^2} \tag{8}$$

$$f_{l_s}=\frac{\pi d_1^2 f_s\varphi}{2Ds} \tag{9}$$

式(6)~式(9)中：f_l 为 SRPE 套管约束力，MPa。不同压力等级的 SRPE 套管约束力见表 5；f_{l_p} 为 HDPE 提供的约束力，MPa；f_{l_s} 为纬线钢丝提供的约束力，MPa；f_{C0} 为非约束混凝土的轴心抗压强度，MPa；f_{CC} 为核心混凝土截面面积，mm²；d_1 为线钢丝的直径，mm；S 为相邻 2 条纬线的中心间距；K 为折算 HDPE 管的外、内径比值；f_p 为 HDPE 材料的屈服极限，MPa。

表 5　不同压力等级 SRPE 管所提供的约束力

Tab.5　Confined stress provided by SRPE pipe with different pressure grade

Pressure grade	1.0	1.6	2.0	2.5
f_l / MPa	4.293	5.092	6.927	7.780

采用经验系数法得出的SRPE套管约束RC柱偏压承载力计算公式，计算得到的偏压承载力计算值，以及与试验实测值的对比结果，如表6所示。N_u为SRPE套管试件偏压承载力计算值，kN；N_v为SRPE套管试件偏压承载力试验值，kN；$\overline{X}$为二者比值的平均值；σ_s为标准差。

表6 SRPE套管约束RC柱偏压承载力计算值、试验值及二者比值

Tab.6 Calculated results and measured results of bearing capacity of SRPE pipe confined reinforced concrete columns subjected to eccentric load

Specimen	N_u/kN	N_v/kN	N_u/N_v
S1-20-600	1 709.519	1 754.430	0.97
S1-40-600	1 346.071	1 605.886	0.84
S2-20-600	2 066.597	2 356.109	0.88
S2-40-600	1 627.198	1 895.269	0.86
S1-20-900	1 690.183	1 712.818	0.99
S1-40-900	1 330.786	1 530.645	0.87
S2-20-900	2 043.299	2 215.195	0.92
S2-40-900	1 608.793	1 737.179	0.93
$\overline{X}$	-	-	0.91
σ_s	-	-	0.05

从表6可以看出，SRPE套管偏压试件的极限承载力计算值均小于试验值，比值平均值为0.91，标准差为0.05，吻合较好，离散性较小。本次试验结果对于低强度混凝土而言偏保守，在工程常用范围内，该公式可为计算SRPE套管钢筋混凝土柱的偏压承载力提供参考。

5 结论

以8根SRPE套管约束钢筋混凝土柱和4根无套管约束的钢筋混凝土柱偏压试验结果为基础，分析了SRPE管公称压力等级、偏心距、长细比等设计参数对偏压试件极限承载力、延性、柱中挠度的影响规律，得出以下主要结论。

1）SRPE套管的环向约束作用显著提高了偏压柱的承载力和延性。

2）偏压试件的承载力随着SRPE管压力等级的提高而提高，随着偏心距和长细比的增大而减小。

3）偏压试件的延性随着长细比的增大而降低，SRPE套管压力等级、偏心距对试件延性的影响则相对较低。

4）无套管试件的柱中峰值挠度要远小于SRPE套管试件的柱中峰值挠度。偏心距或长细比越大，柱中峰值挠度越大，而SRPE套管压力等级的影响相对较小。

5）极限荷载时，SRPE套管钢筋混凝土偏压柱的侧向挠度曲线接近于正弦半波曲线。

6）基于经验系数法提出的SRPE套管约束RC柱偏压承载力计算公式，得出的计算值与试验值吻合较好，可供实际工程应用参考。

参考文献：

[1] 廖孟柯，刘恩龙，付林，等. 盐渍土环境混凝土抗盐离子侵蚀试验研究[J]. 混凝土，2019(1)：81-85.
LIAO M K，LIU E L，FU L，et al. Experimental study on salt ion erosion resistance of concrete in saline soil environment[J]. Concrete，2019(1)：81-85.

[2] 王毅红，贾顺利，周纲，等. 混凝土防盐腐蚀措施的探讨[J]. 西安科技大学学报，2014，34(2)：163-168.
WANG Y H，JIA S L，ZHOU G，et al. Discussion on concrete sanitary and salt corrosion measures[J]. Journal of Xi′an University of Science and Technology，2014，34(2)：163-168.

[3] 程小平. 钢骨架塑料复合管性能分析与研究[D]. 杭州：浙江大学，2003.
CHENG X P. Analysis and research on performance of plastics composite tube of steel skeleton[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2003.

[4] 王俊良，赵勤宽. 钢骨架塑料复合管研制与应用[J]. 工程塑料应用，2000(12)：18-19.
WANG J L，ZHAO Q K. Development and application of the plastic pipe with metal frame[J]. Engineering Plastics Application，2000(12)：18-19.

[5] 王晓璐，查晓雄，张旭琛. 高温下FRP筋与混凝土的粘结性能[J]. 哈尔滨工业大学学报，2013，45(6)：8-15.
WANG X L，ZHA X X，ZHANG X C，Bonding properties of FRP rubs and concrete in high temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2013，45(6)：8-15.

[6] 李晓艳. FRP拉挤制品用环氧树脂基体的湿热耐久性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2012.
LI X Y. Research on hygrothermal durability of epoxy resin matrix for FRP pultruded products[D]. Harbin：Harbin Insti

tute of Technology,2012.

[7] 孙振明,章涛. 荷载和温度作用下 HDPE 管变形特性试验研究[J]. 河南科学,2021,39(4):572-578.
SUN Z M,ZHANG T. Experimental study on the deformation characteristics of HDPE tube under load and temperature[J]. Journal of Science,2021,39(4):572-578.

[8] 王俊颜,杨全兵. HDPE 管混凝土延性和韧性的实验研究[J]. 建筑材料学报,2009,12(4):394-397.
WANG J Y,YANG Q B. Experimental study on ductility and toughness of HDPE pipe concrete[J]. Journal of Building Materials,2009,12(4):394-397.

[9] 高剑平,郝提,霍静思,等. SRPE 套管约束混凝土短柱轴压性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(4):13-23.
GAO J P,HAO T,HUO J S,et al. Experiment on performance of SRPE pipe confined concrete circular stub columns under axial compression [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2021,38(4):13-23.

[10] 涂序纪,高剑平,涂帆,等. SRPE 套管混凝土柱核心混凝土单轴受压应力-应变本构关系模型[J]. 华东交通大学学报,2021,38(5):16-22.
TU X J,GAO J P,TU F,et al. A stress-strain constitutive model for SRPE casing confined concrete under uniaxial compression[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(5):16-22.

[11] 尹昭. SRPE 套管混凝土短柱轴压力学性能研究[D]. 南昌:华东交通大学,2020.
YIN Z. Mechanical behavior of concrete columns confined by SRPE tubes[D]. Nanchang:East China Jiaotong University,2020.

[12] 高剑平,段红伟,彭毅,等. SRPE 套管钢筋混凝土短柱轴压承载力试验研究[J]. 建筑科学,2022,38(7):63-71.
GAO J P,DUAN H W,PENG Y,et al. Experimental research on the mechanical properties of SRPE pipe confined reinforced concrete circular columns subjected to eccentric compression[J]. Building Science,2022,38(7):63-71.

[13] 邹恒之. SRPE 套管钢筋混凝土柱偏心受压力学性能研究[D]. 南昌:华东交通大学,2021.
ZOU H Z. Study on mechanical performance of SRPE pipe confined reinforced concrete circular columns under eccentric compression[D]. Nanchang:East China Jiaotong University,2021.

[14] 蔡绍怀, 焦占拴. 钢管混凝土短柱的基本性能和强度计算[J]. 建筑结构学报,1984(6):13-29.
CAI S H,JIAO Z S. Calculation of basicity and strength of steel tube concrete short columns[J]. Journal of Building Structure,1984(6):13-29.



第一作者:段红伟(1997—),男,硕士研究生,研究方向为新材料组合结构。E-mail:1582388049@qq.com。



通信作者:高剑平(1970—),男,副教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为建筑结构抗震与减震,建筑结构加固改造,组合结构。E-mail:tmxgao@126.com。

(责任编辑:姜红贵)