

引用本文: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 Jian-ping, HAO Ti, HUO Jing-si, 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.

DOI:10.19815/j.jace.2020.10038

SRPE 套管约束混凝土短柱轴压性能试验

高剑平^{1,2}, 郝提¹, 霍静思³, 刘洪⁴

(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 土木工程国家级实验教学示范中心, 江西 南昌 330013; 3. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021; 4. 安源管道实业股份有限公司, 江西 萍乡 337000)

摘要:针对西部盐渍土地区钢筋混凝土桥梁墩柱的腐蚀问题,提出一种新型组合结构“钢骨架聚乙烯塑料复合材料(SRPE)套管约束混凝土柱”,该新型组合结构能够彻底隔离墩柱与各种腐蚀性离子的接触。为研究其轴心受压力学性能,对 12 个 SRPE 套管约束混凝土短柱试件及 3 个素混凝土短柱试件进行了轴心受压试验,分析了混凝土强度等级、SRPE 套管环向约束应力和膨胀剂对试件的破坏形态、荷载-位移曲线、延性和初始压缩刚度的影响规律。根据 SRPE 套管环向约束应力计算方法及约束混凝土短柱抗压强度计算公式,建立了 SRPE 套管约束混凝土短柱轴心抗压强度计算方法。结果表明:SRPE 套管约束混凝土短柱的最终破坏形态均为核心混凝土发生斜剪破坏,且随着 SRPE 套管环向约束应力的增高,试件的剪斜变形角逐渐减小;试件混凝土强度等级越高,其荷载-位移曲线的峰值荷载越大,下降段更陡峭,试件的脆性越大;SRPE 套管能够明显提高试件的承载力、峰值变形及延性,且随着 SRPE 套管环向约束应力的增大,试件各项力学性能均呈逐渐上升趋势;提高混凝土强度等级,试件的承载力提高,但峰值变形和延性有所降低;掺入膨胀剂(质量分数 10%)使试件的承载力降低,而峰值变形、初始压缩刚度及延性则稍有提高;所建立的轴心抗压承载力计算方法可为工程实践提供参考。

关键词:钢骨架聚乙烯塑料复合管;约束混凝土;短柱;轴压试验;承载力;延性

中图分类号: TU599

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)04-0013-11

Experiment on Performance of SRPE Pipe Confined Concrete Circular Stub Columns Under Axial Compression

GAO Jian-ping^{1,2}, HAO Ti¹, HUO Jing-si³, LIU Hong⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China; 4. Anyuan Pipelines Industrial Co., Ltd., Pingxiang 337000, Jiangxi, China)

Abstract: In order to solve the corrosion problem of reinforced concrete bridge piers and columns in saline soil area of Western China, a new type of composite structure “steel reinforced polyethylene plastic (SRPE) pipes casing confined concrete column” was proposed, which could

收稿日期: 2020-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368019)

作者简介: 高剑平(1970-),男,吉林四平人,副教授,工学博士, E-mail: tmxgao@126.com。

completely isolate the pier from various corrosive ions. In order to study its axial compression performance, 12 specimens of SRPE pipe concrete stub columns and 3 specimens of plain concrete stub columns were tested under axial compression, and the influence of concrete strength grade, circumferential constrained stress and expansive agent on the failure form, load-displacement curve, ductility and initial stiffness of the specimens were analyzed. According to the calculation method of circumferential constrained stress of SRPE pipe and the calculation formula of compressive strength of confined concrete stub columns, the calculation method of axial compressive bearing capacity of SRPE pipe concrete stub columns was established. The results show that the ultimate failure mode of SRPE pipe confined concrete stub column is inclined shear failure of core concrete, and with the increase of SRPE pipe circumferential restraint stress, the shear deflection angle of the specimen decreases gradually; the higher the concrete strength grade of the specimens, the greater the peak load of load-displacement curve, the steeper the descending section, and the greater the brittleness of the specimens. SRPE pipe can significantly improve the bearing capacity, peak deformation, initial compression stiffness and ductility of the specimens, and with the increase of circumferential restraint stress of the SRPE pipe, the mechanical properties of the specimens show a trend of gradual increase. With the increase of concrete strength grade, the bearing capacity of specimens increases, but the peak deformation and ductility decrease. The addition of expansive agent (mass fraction of 10%) only reduces the bearing capacity of the specimen, but improves the peak deformation, initial compression stiffness and ductility of the specimen to some extent. The calculation method of axial compressive bearing capacity of pipe concrete short columns can provide reference for engineering practice.

Key words: steel reinforced polyethylene plastic pipe; confined concrete; stub column; axial compression test; bearing capacity; ductility

0 引言

中国西部盐渍土地地区蕴含大量的矿产资源,生产经营极度依赖公路、铁路等运输方式,因此需要修建大量的铁路桥和公路桥。桥梁墩柱作为桥梁主要的承重和抗侧力构件,下部直接与盐渍土接触,其耐久性直接关系到桥梁结构的安全和使用寿命。在西部地区的桥梁建设中,虽然采用了防腐涂装工艺、包裹耐腐蚀材料等技术手段进行防腐,但对于盐渍化程度较高地区的桥梁,腐蚀问题仍未得到完全解决,每年都需进行大规模的修复和维护,造成巨大的经济损失^[1-2]。基于以上背景,本文提出了一种新型组合结构“钢骨架聚乙烯塑料复合材料(SRPE)管约束混凝土柱”,SRPE套管除了能够彻底隔离墩柱与各种腐蚀性离子的接触,还能约束混凝土以利于抗震。

自 Xiao 等^[3]首次提出了“套管柱”(Tubed Column)的概念以来,国内外学者对钢套管柱的力学性能进行了系统的研究。出于防腐的考虑,近年来研究者^[4-7]对塑料套管柱展开了研究。Kurt^[6]最早研究了聚氯乙烯(PVC)管混凝土柱力学性能;Saafi^[7]

提出在 PVC 管上刻槽并缠绕 FRP,但刻槽施工难度大,且容易在刻槽位置引起应力集中。于峰等^[8-10]对 CFRP 条带按一定间距缠绕在 PVC 管上,制成 CFRP 增强 PVC 管钢筋混凝土柱,并进行了轴压试验^[8]、偏压试验^[9]、拟静力试验^[10];姜绍飞等^[11-12]对 FRP-PVC 管细长柱进行了拟静力试验和轴压试验研究;Fakharifar 等^[13]在 CFRP 和 PVC 管外壁之间设置泡沫塑料带,以延缓环向 CFRP 断裂,从而提高柱的延性和极限变形能力;王俊颜等^[14]对高密度聚乙烯(HDPE)管约束不同强度混凝土进行了轴压试验,结果表明,HDPE 管可以非常显著地提高不同强度混凝土的变形能力。

本文采用的 SRPE 套管是由钢丝网增强骨架与 HDPE 基体共挤成型的复合管(图 1)^[15],它很好地克服了涂塑钢管界面易分离、HDPE 管耐腐不耐压、应力松弛等缺点,同时耐各类酸碱盐的腐蚀,耐紫外线,耐高温和严寒,而且使用寿命长^[16],相比于钢管的不耐腐,FRP 的基体树脂不耐光和高温(60℃开始软化)^[17],PVC 的耐温性差及低温变脆^[18],SRPE 套管更能适合西部强盐渍土地地区。本

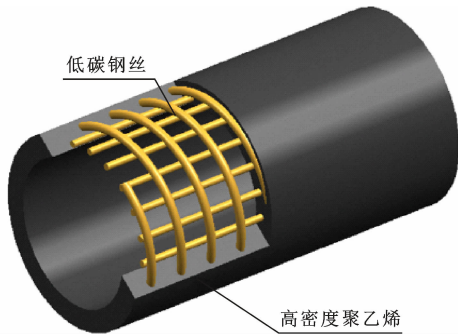


图 1 SRPE 套管结构

Fig. 1 SRPE Pipe Structure

文针对 SRPE 套管约束混凝土短柱的轴心受压力学性能进行了研究,为该类组合结构的进一步研究和工程实践提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

以 SRPE 套管公称压力等级、混凝土强度以及混凝土是否掺入膨胀剂作为控制参数,设计并制作了 3 组 12 根 SRPE 套管混凝土短柱试件,同时设计了 C30、C60 和 C60U 素混凝土柱各 1 根作为对比试件,具体设计参数详见表 1。SRPE 套管由江西省

表 1 试件设计参数及力学性能

Tab. 1 Design Parameters and Mechanical Properties of Specimens

试件编号	D_i /mm	L /mm	f_r /MPa	f_{co} /MPa	N_{uc} /kN	K	Δ /mm	E_0 /(MN·mm ⁻¹)	μ_D	N_{uc} /kN	N_{uc}/N_{uc}
C30	200	600		30.11	945.5		1.38		1.65	945.5	1.000
S-1.0-30	200	600	4.29	30.11	1 606.1	1.70	7.44	0.87	2.96	1 656.1	1.031
S-1.6-30	200	600	5.09	30.11	1 749.8	1.85	7.74	1.02	3.10	1 756.2	1.004
S-2.0-30	200	600	6.93	30.11	2 124.0	2.25	7.98	1.15	3.26	1 962.6	0.924
S-2.5-30	200	600	7.78	30.11	2 177.3	2.30	8.76	1.19	3.45	2 048.5	0.941
C60	200	600		49.03	1 539.5		2.04		1.31	1 539.5	1.000
S-1.0-60	200	600	4.29	49.03	2 431.9	1.58	2.88	1.42	1.72	2 317.5	0.953
S-1.6-60	200	600	5.09	49.03	2 624.2	1.70	3.06	1.63	1.89	2 436.7	0.929
S-2.0-60	200	600	6.93	49.03	2 693.2	1.75	3.30	1.64	2.14	2 689.5	0.999
S-2.5-60	200	600	7.78	49.03	3 229.1	2.10	3.60	1.86	2.29	2 797.5	0.860
C60U	200	600		48.37	1 518.8		2.10		1.40	1 518.8	1.000
S-1.0-60U	200	600	4.29	48.37	2 283.9	1.50	2.70	1.77	1.95	2 295.1	1.005
S-1.6-60U	200	600	5.09	48.37	2 412.8	1.59	3.18	1.80	2.08	2 413.8	1.000
S-2.0-60U	200	600	6.93	48.37	2 570.4	1.69	3.48	1.82	2.27	2 665.4	1.037
S-2.5-60U	200	600	7.78	48.37	2 911.4	1.92	3.90	1.92	2.50	2 772.8	0.952

注:试件编号中第 1 个字母 S 代表 SRPE 套管混凝土短柱,第 2 个数字表示 SRPE 套管公称压力等级,最后一个数字表示混凝土强度等级;U 表示掺入膨胀剂; D_i 为 SRPE 套管内径; L 为试件长度; f_r 为 SRPE 套管环向约束应力; N_{uc} 为试件峰值荷载; K 为峰值荷载提高系数; Δ 为峰值荷载对应的峰值变形; E_0 为试件初始压缩刚度; μ_D 为延性系数; N_{uc} 为公式计算得到的轴压承载力; f_{co} 为无约束混凝土的轴心抗压强度。

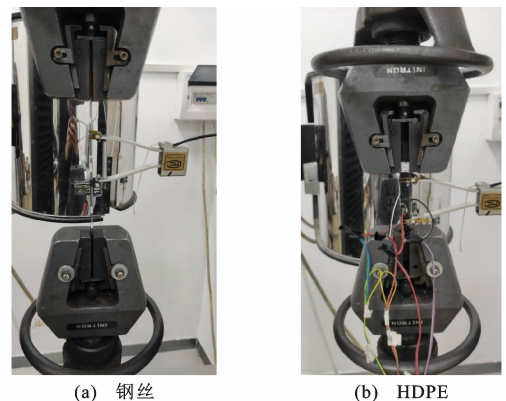
萍乡市安源管道实业股份有限公司生产提供。

1.2 材料力学性能

本文试验所用复合管的结构为:内径 200 mm, 外径 225 mm, 壁厚 12.5 mm。1.0、2.0 MPa 压力等级的 SRPE 套管中的经线、纬线低碳钢丝直径分别为 2.02、2.52 mm, 2.5 MPa 压力等级的 SRPE 套管中的经线、纬线低碳钢丝直径分别为 2.02、3.01 mm。图 2 为钢丝与高密度聚乙烯材料的拉伸试验,表 2 和表 3 分别为 SRPE 套管低碳钢丝和 HDPE 的材料特性。

1.3 加载方案与测量方案

试验加载设备为华东交通大学结构试验中心的 NYL-500 t 压力试验机,所有试件均为轴心受压,加



(a) 钢丝

(b) HDPE

图 2 材料拉伸试验

Fig. 2 Material Tensile Test

表 2 钢丝材料特性

Tab. 2 Material Property of Steel Wire

钢丝直径/ mm	泊松比	弹性模量/ 10 ⁵ MPa	弹性极限/ MPa	拉伸强度/ MPa
2.52	0.30	2.07	598.5	701.0
3.01	0.30	2.00	574.6	676.5

表 3 HDPE 材料特性

Tab. 3 Material Property of HDPE

材料	泊松比	弹性模量/ MPa	弹性极限/ MPa	拉伸强度/ MPa
HDPE	0.53	1 391	6.23	19.9

载方式为单调加载,加载制度采用荷载控制的静力加载方式。试件两侧对称布置 2 个机电位移计,试件中部的横向和纵向间隔 90°各对称布置 4 个电阻应变片。正式加载前对试件进行预加载,预加载值为 200 kN,检查试件、仪器是否正常运行。当加载至预估极限荷载的 30%左右时,读取试件 4 个轴向应变,微调试件,直至各点应变均匀。正式加载参照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)的规定,直至荷载下降到峰值荷载的 60%时停止试验。加载装置和测量装置如图 3 所示。

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

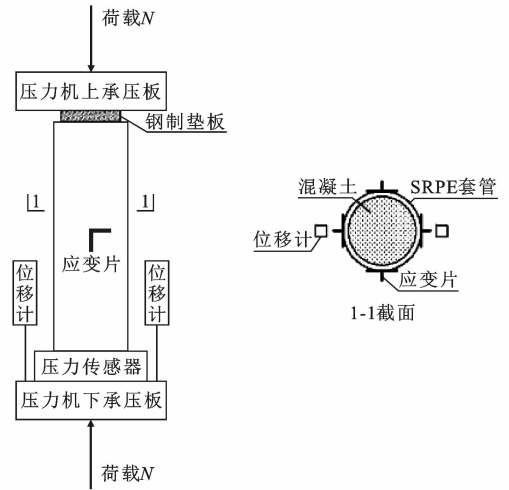
分别以试件 S-1.6-30, S-1.6-60 和 S-1.6-60U 为例,说明 2 种混凝土强度等级试件的典型破坏形态,见图 4。试件均呈斜剪破坏,图 4 中白线示出了破坏面,加载完成后,剥离 SRPE 套管,核心混凝土的破坏形态均为斜剪破坏,图 4 中黑线示出了破坏面。试件破坏后,SRPE 套管未出现开裂或撕裂的现象,表明 SRPE 套管具有极好的变形能力。对于 C30 混凝土试件,试件呈中部斜剪破坏,剪斜变形角约为 40°,破坏面周围分布很多不规则的细小裂缝,见图 4(a),其余 C30 试件破坏现象类似;对于 C60 或 C60U 混凝土试件,试件均呈中下部斜剪破坏,剪斜变形角约为 45°,破坏面较小且周围裂缝较少,见图 4(b),C60 或 C60U 试件破坏现象类似。通过观察所有 SRPE 套管约束混凝土短柱试件的破坏形态可以看出:在混凝土强度等级相同的条件下,随着套管压力等级的提高,剪斜变形角逐渐减小。

2.2 荷载-轴向位移曲线

图 5 为试件的荷载-轴向位移($N-\Delta$)曲线。由图 5(a)可以看出,在不同 SRPE 套管压力等级条件下,各试件的 $N-\Delta$ 曲线形状大体相似,主要分为线



(a) 加载装置



(b) 测量装置

图 3 加载及测量装置

Fig. 3 Loading and Measuring Devices

弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段和破坏阶段。在加载前期,由于荷载较小,试件的轴向位移与荷载呈线性递增关系,试件处于线弹性阶段,各曲线非常接近,SRPE 套管尚未开始对核心混凝土起到约束作用。随着荷载的逐渐增加,各位移曲线的切线模量开始降低,核心混凝土内部裂缝发展,试件即进入弹塑性阶段。当荷载超过试件极限荷载后, $N-\Delta$ 曲线变得平缓,试件的荷载下降速度很慢,但位移速度加快,此时试件处于下降阶段。当位移发展到一定阶段后,承载力突然降低很快,此时试件进入破坏阶段。虽然各试件 $N-\Delta$ 曲线形状大体相似,但对于不同 SRPE 套管压力等级的试件,显然压力等级越高,峰值荷载和峰值位移也越大。在弹塑性阶段,曲线斜率更陡,代表约束刚度越大,下降段也越平缓。曲线组差别越大,说明压力等级影响越显著。

C60 混凝土试件的 $N-\Delta$ 曲线如图 5(b)所示, C60 混凝土试件与 C60U 混凝土试件破坏过程的

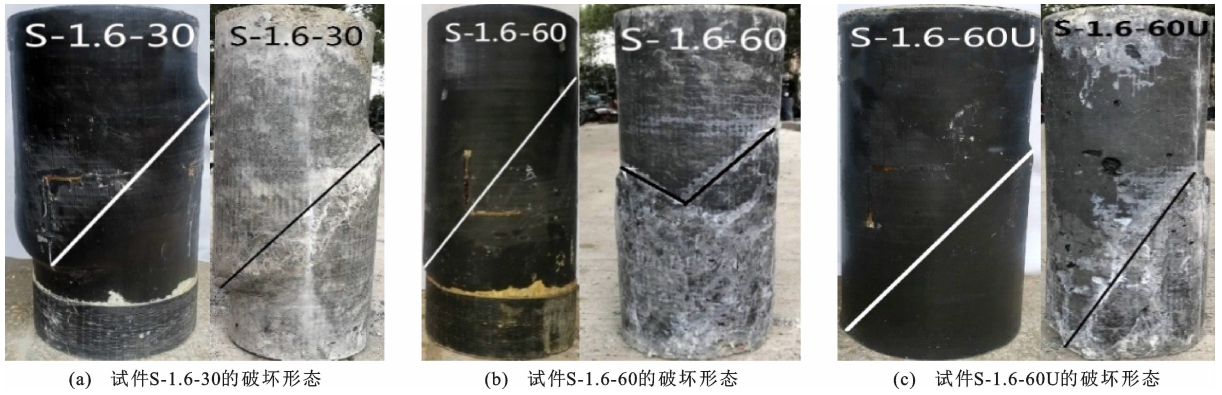


图 4 SRPE 套管约束混凝土短柱破坏形态

Fig. 4 Failure Modes of SRPE Pipe Confined Concrete Short Columns

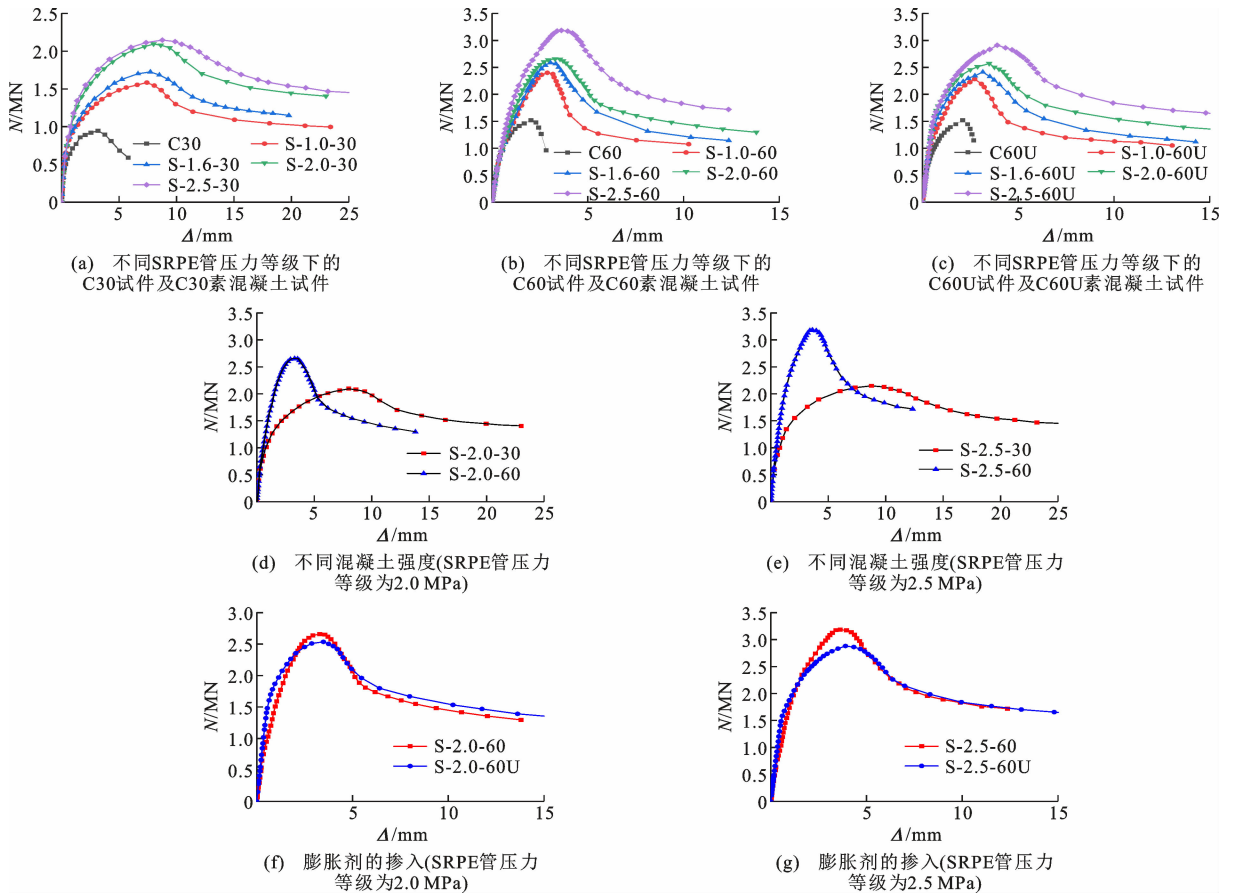


图 5 荷载-轴向位移曲线

Fig. 5 Load-axial Displacement Curves

$N-\Delta$ 曲线形状大体一致,破坏过程可分为线弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段 3 个阶段。在加载前期, $N-\Delta$ 曲线基本呈线性上升,此时试件处于线弹性阶段;随着荷载的持续增加, $N-\Delta$ 曲线走势稍有平缓,试件位移发展速度开始加快,各曲线的切线模量开始降低,此时试件进入弹塑性阶段;有别于 C30 混凝土试件,由于 C60 混凝土峰值荷载前期刚度更大,在达到峰值荷载前变形较小,故 C60 混凝土试

件弹塑性阶段较短且无明显塑性阶段;在荷载超过极限荷载后, $N-\Delta$ 曲线开始下降,试件的荷载下降速度较快,且试件轴向位移加大,此时试件处于破坏阶段。

通过图 5(a),(b),(c)可以看出:相比于各混凝土强度等级下的素混凝土试件,SRPE 套管均明显提高了各试件的极限承载力和延性,同时各试件的峰值位移也得到增大;相比于 C60 和 C60U 混凝土

试件, C30 混凝土试件的承载力提升幅度和峰值位移提升幅度更大, 且具有更好的延性。当混凝土强度等级相同时, SRPE 套管压力等级越大的试件[图 5(a), (b)], 其 $N-\Delta$ 曲线的峰值荷载和峰值位移越大, 且峰值荷载后承载力下降减慢, 说明随 SRPE 套管压力等级的提高, 试件的延性升高; 对于混凝土强度等级不同的试件[图 5(d), (e)], 混凝土强度等级越大, 其 $N-\Delta$ 曲线的峰值荷载越大, 下降段更陡峭, 说明混凝土强度等级越大, 试件的脆性越大; 而对于膨胀剂掺入与否的试件, 曲线的上升段和下降段没有明显的差异[图 5(f), (g)]。

3 轴压性能及参数分析

SRPE 套管的公称压力等级代表了管壁能够给予混凝土的环向约束力大小, 因此本文采用具有明确物理意义的环向约束应力 f_r 代替公称压力等级来表征 SRPE 套管公称压力等级对试件各项力学性能的影响规律。由于 SRPE 套管中的钢丝与 HDPE 完全属于结构复合, 各自的力学性能不变, 故 SRPE 套管对混凝土的约束作用是由环向钢丝与 HDPE 两者的强度叠加组成, 纵向钢丝的作用可忽略不计, SRPE 套管受力分析如图 6 所示, 其中, D_{FM} 为 SRPE 套管中径, D_{PO} 为 SPE 套管外径^[19], 本文中 SRPE 套管环向约束应力与 SRPE 套管最大约束应力表述的意义相同, 故 SRPE 套管环向约束应力 f_r 等同于 SRPE 最大约束应力 f_{Fcb} 。因此运用式(1)可以计算其最大约束应力 f_{Fcb} , 各试件的 f_{Fcb} 计算结果见表 1。

$$f_r = f_{Fcb} = f_{scb} + f_{pcb} \quad (1)$$

式中: f_{scb} 为环向钢丝计算最大约束应力; f_{pcb} 为 HDPE 管的计算最大约束应力。

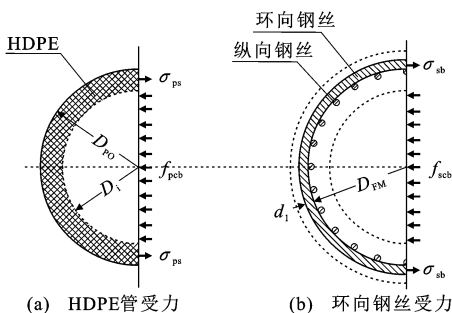


图 6 SRPE 套管受力分析图

Fig. 6 Stress Analysis Chart of SRPE Pipe

环向钢丝的计算最大约束应力 f_{scb} 按式(2)计算

$$2 \times \frac{\pi d_1^2}{4} \sigma_{sb} \phi \cos(\theta) = f_{scb} D_i S \quad (2)$$

换算得

$$f_{scb} = \frac{\pi d_1^2 \sigma_{sb} \phi \cos(\theta)}{2 D_i S} \quad (3)$$

式中: d_1 为环向钢丝直径; σ_{sb} 为环向钢丝(直径不大于 5 mm)拉伸极限应力; S 为环向钢丝中心距, 本文中 SRPE 套管压力等级 1.0~2.5 MPa 的环向钢丝中心距分别为 12, 9.5, 8, 5.5 mm; ϕ 为纵向钢丝与环向钢丝的焊接减弱系数 0.85; θ 为环向钢丝螺旋角, 计算时 $\cos(\theta)$ 可忽略不计。

HDPE 管的环向最大约束应力 f_{pcb} 以最大剪应力时的当量应力公式按以下方法计算: 在单位长度的(每米)SRPE 套管内, 将环向、纵向钢丝体积去掉后, 以剩余的 HDPE 体积折合成与 SRPE 套管同长、同内径(也可同中径, 两者差别极小)的纯 HDPE 管, 简称折合 HDPE 管。SRPE 套管中 HDPE 的环向最大约束应力 f_{pcb} 按式(4)计算

$$f_{pcb} = \frac{\sigma_{ps}(k^2 - 1)}{2k^2} \quad (4)$$

式中: σ_{ps} 为 HDPE 材料的屈服极限应力; k 为折合 HDPE 管的外径、内径比。

因此, SRPE 套管的最大约束应力 f_{Fcb} 计算公式为

$$f_{Fcb} = f_{scb} + f_{pcb} = \frac{\pi d_1^2 \sigma_{sb} \phi}{2 D_i S} + \frac{\sigma_{ps}(k^2 - 1)}{2k^2} \quad (5)$$

3.1 峰值荷载

3.1.1 SRPE 套管环向约束应力对峰值荷载的影响规律

峰值荷载提高系数 K 的定义见式(6), 各试件的 K 值计算结果详见表 1。

$$K = \frac{N_i}{N_0} \quad (6)$$

式中: N_i 为 SRPE 套管混凝土短柱峰值荷载试验值; N_0 为普通混凝土柱峰值荷载试验值。

图 7 给出了各组试件(C30 组、C60 组、C60U 组) K 值随 SRPE 套管环向约束应力的变化关系, R^2 为判定系数。可以看出, 各组试件的 K 值均呈线性上升趋势。这是由于 SRPE 套管压力等级越大, 其环向约束力就越大, 约束混凝土内部微裂缝发展的效果越好。另外, 随着 SRPE 套管环向约束应力的提高, 3 组试件(C30, C60 和 C60U)的峰值荷载提高系数均有所提高, 但 C30 组提高幅度高于其他 2 组, C60 和 C60U 相差不大。

3.1.2 膨胀剂对峰值荷载的影响规律

由表 1 可知, 随着 SRPE 套管环向约束应力的提高, 相比于各 C60 组试件, C60U 试件的峰值荷载

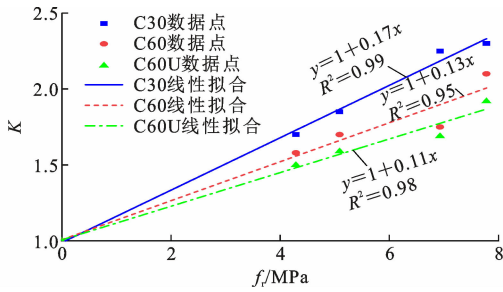


图 7 SRPE 套管环向约束应力对不同混凝土强度等级试件 K 值的影响规律

Fig. 7 Effects of Circumferential Confinement Stress of SRPE Pipe on K Values of Specimens with Different Concrete Strength Grades

分别降低了 6.09%, 8.06%, 4.56% 和 9.84%, 降低幅度均在 10% 以内, 说明掺入膨胀剂略微降低了试件的极限承载力, 但影响有限。

3.2 峰值变形

3.2.1 SRPE 套管环向约束应力对峰值变形的影响规律

图 8 为 3 组试件的峰值变形随 SRPE 套管环向约束应力的变化关系。随着套管环向约束应力的增大, 3 组试件的峰值变形逐渐提高, 相比于同组 SRPE 套管压力等级为 1.0 MPa 的试件, C30, C60, C60U 组试件的提高幅度分别为 4%~18%, 6%~25% 和 18%~44%。

3.2.2 混凝土强度等级对峰值变形的影响规律

图 9 为混凝土强度等级对峰值变形的影响柱状图。混凝土强度越高, 试件的峰值变形越小。在相同环向约束应力作用下, C30 试件的峰值变形大约为 C60 试件的 2.5 倍。

3.2.3 膨胀剂对峰值变形的影响规律

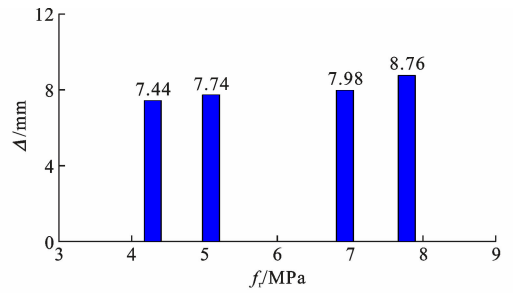
图 10 为膨胀剂对峰值变形的影响。在相同的环向约束应力作用下, 相比于未掺入膨胀剂的试件, 掺入膨胀剂试件的峰值变形提高幅度在 4%~8% 之间。

3.3 初始压缩刚度

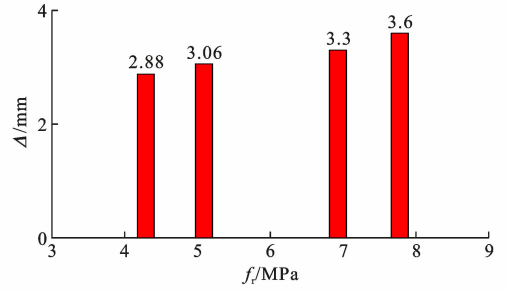
3.3.1 SRPE 套管环向约束应力对初始压缩刚度的影响规律

利用实测的荷载-位移曲线对应的弹性阶段求出各试件的初始压缩刚度, 结果见表 1。

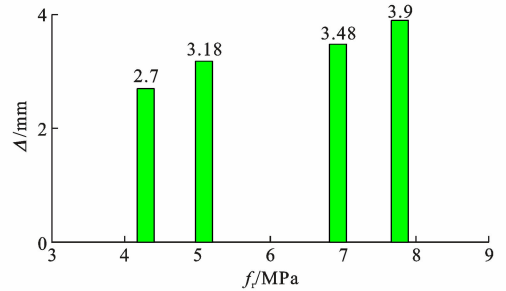
图 11 为试件的初始压缩刚度 E₀ 随 SRPE 套管环向约束应力的变化关系。随着 SRPE 套管环向约束应力的增大, 3 组试件的初始压缩刚度呈逐渐提高的趋势, 相比于同组 SRPE 套管压力等级为 1.0 MPa 的试件, 其余试件的初始压缩刚度提高幅度分



(a) C30 组试件



(b) C60 组试件



(c) C60U 组试件

图 8 SRPE 套管环向约束应力对峰值变形的影响规律

Fig. 8 Effects of Circumferential Confinement Stress of SRPE Pipe on Peak Deformation

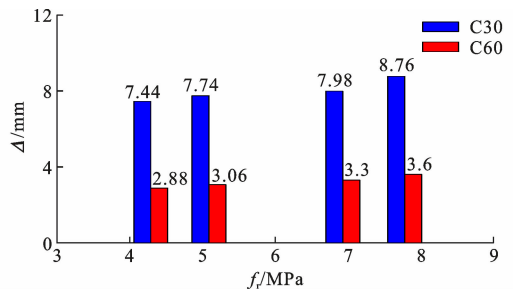


图 9 混凝土强度等级对峰值变形的影响

Fig. 9 Effects of Concrete Strength Grade on Peak Deformation

别为 17%~37%, 14%~31% 和 1%~9%。混凝土强度等级越高, 相同 SRPE 套管环向约束应力情况下, 初始压缩刚度提高越小。

3.3.2 混凝土强度等级对初始压缩刚度的影响规律

图 12 给出了混凝土强度等级对初始压缩刚度的影响柱状图。当套管环向约束应力一定时, 混凝土

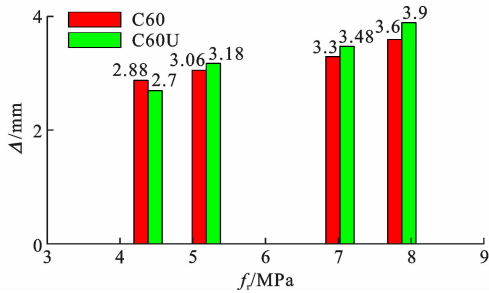
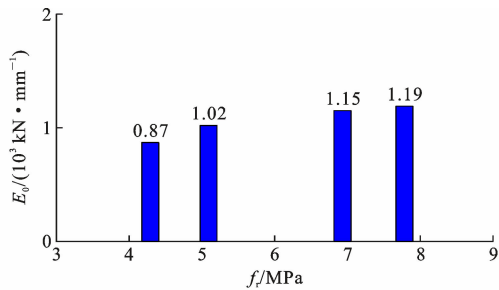
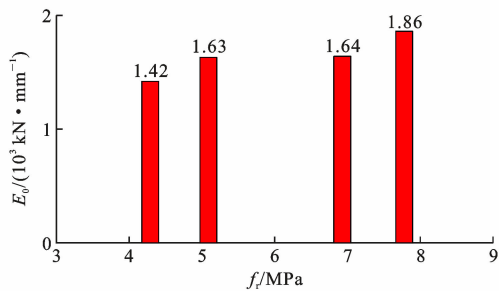


图 10 掺入/未掺入膨胀剂对峰值变形的影响

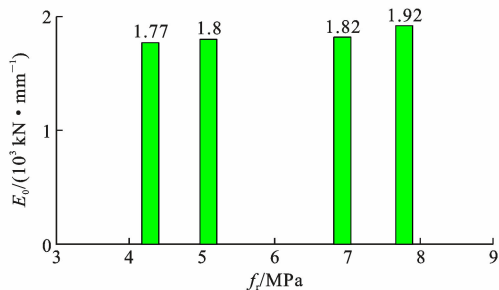
Fig. 10 Effects of With/Without Expanding Agent on Peak Deformation



(a) C30组试件



(b) C60组试件



(c) C60U组试件

图 11 SRPE 套管环向约束应力对初始压缩刚度的影响

Fig. 11 Effects of Circumferential Confinement Stress of SRPE Pipe on Initial Stiffness

土强度等级越大的试件,其初始压缩刚度越大。在相同环向约束应力作用下,对于 C60 试件,其初始压缩刚度大约为 C30 试件的 1.5 倍。

3.3.3 掺入/未掺入膨胀剂对初始压缩刚度的影响规律

图 13 为掺入/未掺入膨胀剂对初始压缩刚度的影响。随着膨胀剂(质量分数为 10%)的掺入,试件

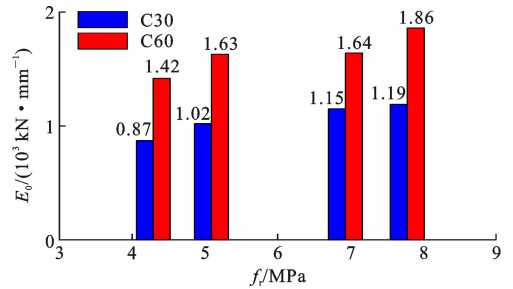


图 12 SRPE 套管环向约束应力对不同混凝土强度等级试件初始压缩刚度的影响

Fig. 12 Effects of Circumferential Confinement Stress of SRPE Pipe on Initial Stiffness of Specimens with Different Concrete Strength Grades

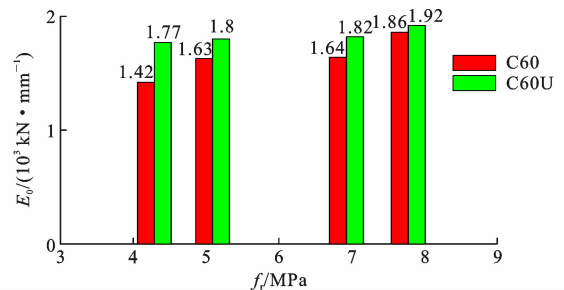


图 13 掺入/未掺入膨胀剂对初始压缩刚度的影响

Fig. 13 Effects of With/Without Expanding Agent on Initial Stiffness

的初始压缩刚度略大于未掺膨胀剂的试件。在相同环向约束应力作用下,相比于未掺入膨胀剂的试件,掺入膨胀剂试件的初始压缩刚度提高幅度在 3%~25% 之间。

3.4 延性

引入轴压位移延性系数表征试件的延性性能,用能量等值法^[20]确定初始屈服位移,并运用式(7)计算其延性系数 μ_D ,各试件的 μ_D 详见表 1。

$$\mu_D = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (7)$$

式中: Δ_u 为截面或构件承载力没有明显降低情况下的极限位移,取峰值荷载下降 15% 时对应的位移值; Δ_y 为截面或构件开始屈服时的屈服变形。

3.4.1 SRPE 套管环向约束应力对延性的影响规律

图 14 为试件的延性系数随 SRPE 套管环向约束应力的变化关系。当核心混凝土强度等级相同时,试件的延性系数随 SRPE 套管环向约束应力的增大而提高,而且大于无约束混凝土短柱。由表 1 可知,与无约束混凝土短柱相比,3 组混凝土试件 μ_D 分别提升了 1.79 倍~2.09 倍、1.30 倍~1.73 倍和 1.39 倍~1.79 倍,总体上,在外部 SRPE 套管的约

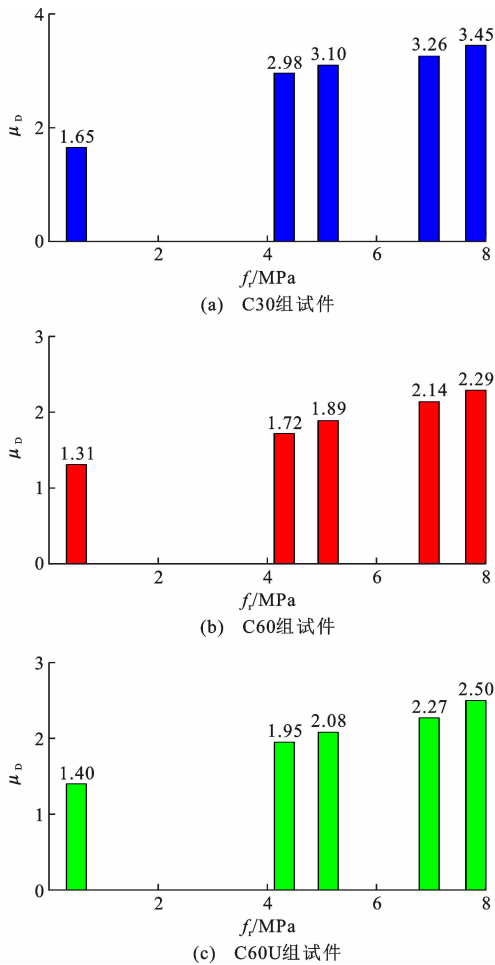


图 14 SRPE 套管环向约束应力对位移延性系数的影响
Fig. 14 Effects of Circumferential Confinement Stress of SRPE Pipe on Displacement Ductility Coefficient

束下,试件具有更好的延性。

3.4.2 混凝土强度等级对延性的影响规律

图 15 为试件的延性系数随混凝土强度等级的变化关系。可见,混凝土强度等级对试件延性的影响较显著,随着混凝土强度等级的提高,试件延性系数大幅降低,相对于素混凝土的提升幅度越来越小。由表 1 可知,相比于 C30 和 C60 素混凝土试件,S-2.5-30 和 S-2.5-60 的 μ_D 分别为对应素混凝土试件的 2.09 倍和 1.73 倍。可见,混凝土强度等级越高,其脆性越大,环向应变越小,SRPE 套管对混凝土的约束作用越弱。

3.4.3 膨胀剂对延性的影响

图 16 为膨胀剂掺入与否对位移延性系数的影响。随着膨胀剂(质量分数 10%)的掺入, μ_D 略有提高。由表 1 可知,在混凝土强度等级相同的情况下,随着 f_r 的增大,掺入膨胀剂试件的 μ_D 分别为未掺入膨胀剂试件的 1.13 倍、1.10 倍、1.02 倍和 1.09

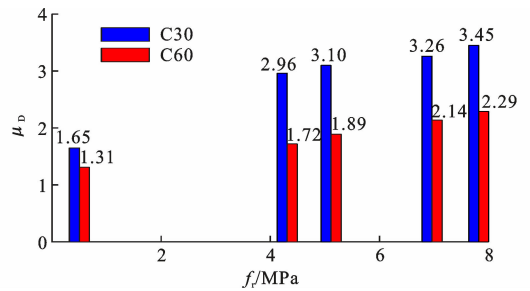


图 15 混凝土强度等级对位移延性系数的影响
Fig. 15 Effects of Concrete Strength Grade on Displacement Ductility Coefficient

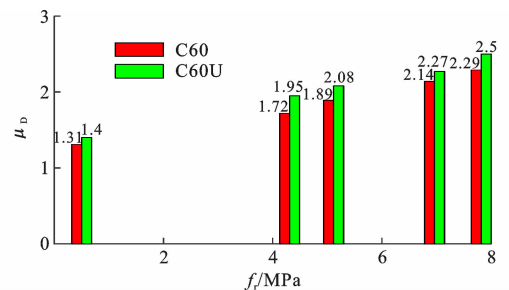


图 16 掺入/未掺入膨胀剂对位移延性系数的影响
Fig. 16 Effects of With/Without Expanding Agent on Displacement Ductility Coefficient

倍。可见,掺入膨胀剂有利于提高试件的非弹性变形能力。

3.5 SRPE 套管轴压短柱承载力计算公式

由于 SRPE 套管约束混凝土柱的受力原理与钢管约束混凝土的相同,因此对于 SRPE 管约束混凝土的承载力计算公式可参照钢管约束混凝土的承载力计算公式^[21]。SRPE 套管混凝土柱的轴压承载力 N_u 计算公式为

$$N_u = f_{cc} A_c \quad (8)$$

$$f_{cc(\text{Mander})} = f_{c0} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f_{c0}} - 2 \frac{f_r}{f_{c0}}} \right) \quad (9)$$

式中: f_{cc} 为核心混凝土的轴心抗压强度; A_c 为核心混凝土截面面积; $f_{cc(\text{Mander})}$ 为 Mander 公式计算得出的核心混凝土轴心抗压强度^[22-23]。

表 1 中给出了本文公式计算结果与试验结果的对比,对于计算结果而言,整体略微保守。图 17 为 SRPE 套管环向约束应力下试件轴心抗压强度计算值与试验值的比值。

4 结 语

(1)SRPE 套管约束混凝土短柱的最终破坏形态基本相同,构件的破坏形态均为核心混凝土的斜

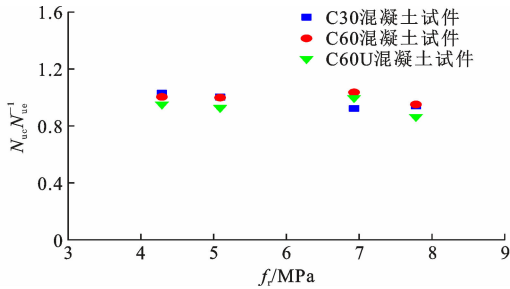


图 17 轴心抗压强度计算值与试验值之比

Fig. 17 Ratio of Calculated Value to Experimental Value of Axial Compressive Strength

剪破坏,且随着 SRPE 套管环向约束应力的增大,试件的剪斜变形角逐渐减小。

(2)试件混凝土强度等级越大,其 $N-\Delta$ 曲线的峰值荷载越大,下降段越陡峭,说明混凝土强度等级越大,试件的脆性越大。与 C30 试件相比,C60 试件的荷载-位移曲线在弹性阶段的斜率更大,峰值点过后具有更明显的下降段。相比于 C60 试件,C30 混凝土试件的承载力提升幅度和峰值位移提升幅度更大,且具有更好的延性。

(3)SRPE 套管能够明显提高试件的承载力、峰值变形、初始压缩刚度及延性,且随着 SRPE 套管环向约束应力的增大,试件各项力学性能均表现出逐渐上升的趋势。

(4)提高混凝土强度等级,一方面使得试件的承载力和初始压缩刚度得到了提高,另一方面却降低了试件的峰值变形和延性,且后两者力学性能降低幅度要大于前两者的提升幅度。

(5)膨胀剂(质量分数为 10%)的掺入降低了试件承载力,但降低幅度不大,可忽略不计,而其对试件的峰值变形、初始压缩刚度及延性却起到了一定的提高作用,但提高效果不明显。

(6)根据 SRPE 套管环向约束应力计算方法及约束混凝土短柱抗压强度计算公式,建立了 SRPE 套管混凝土短柱抗压承载力计算方法,计算值和试验值吻合较好,可为工程实践提供参考。

参考文献:

References:

[1] 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 Yi-hong, JIA Shun-li, ZHOU Gang, et al. Measures of Salt Corrosion Resistance for Concrete [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014, 34(2):163-168.

[2] 张誉,蒋利学,张伟平,等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
ZHANG Yu, JIANG Li-xue, ZHANG Wei-ping, et al. Durability of Concrete Structures [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003.

[3] XIAO Y, TOMII M, SAKINO K. Experimental Study on Design Method to Prevent Shear Failure of Reinforced Concrete Short Circular Columns by Confining in Steel Tube[J]. Transactions of Japan Concrete Institute, 1986, 8:535-542.

[4] FAKHARIAR M, CHEN G D. FRP-confined Concrete Filled PVC Tubes: A New Design Concept for Ductile Column Construction in Seismic Regions[J]. Construction and Building Materials, 2016, 130:1-10.

[5] ABDULLA N A. Concrete Filled PVC Tube: A Review[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156:321-329.

[6] KURT C E. Concrete Filled Structural Plastic Columns[J]. Journal of the Structural Division, 1978, 104(1):55-63.

[7] SAAFI M. Development and Behavior of a New Hybrid Column in Infrastructure Systems[D]. Huntsville: The University of Alabama in Huntsville, 2001.

[8] 于峰,牛荻涛. PVC-CFRP 管钢筋混凝土轴压短柱试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6):129-136.
YU Feng, NIU Di-tao. Experimental Study on PVC-CFRP Confined Reinforced Concrete Short Column Under Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6):129-136.

[9] 于峰,黎德光,牛荻涛,等. 偏心受压 PVC-FRP 管钢筋混凝土柱承载力分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2014, 46(5):660-664, 670.
YU Feng, LI De-guang, NIU Di-tao, et al. Analysis on Bearing Capacity of PVC-FRP Confined Reinforced Concrete Column Under Eccentric Compression [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2014, 46(5):660-664, 670.

[10] 于峰,徐国士,程安春. PVC-CFRP 圆管钢筋混凝土柱恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9):66-72.
YU Feng, XU Guo-shi, CHENG An-chun. Study on Restoring Force Model of PVC-CFRP Tube Confined Reinforced Concrete Column [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9):66-72.

[11] 姜绍飞,吴智林,吴兆旗,等. FRP-PVC 管约束圆形截面钢筋混凝土组合柱滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2):111-118.

- JIANG Shao-fei, WU Zhi-lin, WU Zhao-qi, et al. Experimental Study on Reinforced Concrete Columns Confined by FRP-PVC Tubes Under Reversed Loading[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 111-118.
- [12] JIANG S F, MA S L, LIANG C L, et al. Axial Behavior of CFRP-PVC Confined Concrete Stubs[J]. Advanced Science Letters, 2012, 9(1): 197-203.
- [13] FAKHARIFAR M, CHEN G. Compressive Behavior of FRP-confined Concrete-filled PVC Tubular Columns[J]. Composite Structures, 2016, 141: 91-109.
- [14] 王俊颜, 杨全兵. HDPE管混凝土延性和韧性的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 394-397.
WANG Jun-yan, YANG Quan-bing. Experimental Study on Ductility and Toughness of HDPE-pipe Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(4): 394-397.
- [15] HG/T 3690—2012, 工业用钢骨架聚乙烯塑料复合管[S].
HG/T 3690—2012, Steel Framed Polyethylene Plastic Pipes for Industry[S].
- [16] 孙红轸, 马文琦, 孙 军. 钢骨架塑料复合管长期静液压性能的评定[J]. 工程塑料应用, 2003, 31(10): 50-52.
SUN Hong-yi, MA Wen-qi, SUN Jun. Evaluation of the Long-term Hydrostatic Strength of Steel Reinforced Plastics Pipe[J]. Engineering Plastics Application, 2003, 31(10): 50-52.
- [17] 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 Xiao-lu, ZHA Xiao-xiong, ZHANG Xu-chen. Bond Behavior of FRP Rebar and Concrete at Elevated Temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 8-15.
- [18] 陈 勇, 李统一, 宋科明, 等. 聚氯乙烯管道行业中关键共性难题探讨[J]. 现代化工, 2020, 40(4): 10-11, 16.
CHEN Yong, LI Tong-yi, SONG Ke-ming, et al. Analysis on Key Common Issues in PVC-based Pipeline Industry[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(4): 10-11, 16.
- [19] 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 Xiao-ping. Analysis and Study on Properties of Steel Framed Polyethylene Plastic Pipes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [20] 熊海明, 梁厚燃, 梁 莹, 等. 多重螺旋筋复合约束钢筋混凝土圆形截面短柱轴压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(1): 84-90.
XIONG Hai-ming, LIANG Hou-ran, LIANG Ying, et al. Experimental Research on the Performance of Composite Confined Reinforced Concrete Circular Column with Multiple Spiral Stirrups Under Axial Compression[J]. Industrial Construction, 2020, 50(1): 84-90.
- [21] 周绪红, 刘界鹏, 张素梅. 圆钢管约束钢筋混凝土短柱的轴压力学性能[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 53-59.
ZHOU Xu-hong, LIU Jie-peng, ZHANG Su-mei. Behavior of Circular Tubed Reinforced Concrete Stub Columns Under Axial Compression[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 53-59.
- [22] 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 Zhao. Mechanical Behavior of Concrete Columns Confined by SRPE Tubes[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.
- [23] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.