文章编号:1674-2974(2020)09-0104-09

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2020.09.012

RPC 管-海水海砂混凝土组合柱抗压性能

单波1,2+, 王志鸿1, 肖岩3, 赖大德1

(1.建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
2.绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室,湖南 长沙 410082;
3.浙江大学 浙大-伊利诺大学联合学院,浙江 海宁 314400)

摘要:在配有碳纤维增强塑料(CFRP)封闭箍筋的活性粉末混凝土(RPC)预制管内浇筑 海水海砂混凝土(SWSSC),形成一种新型组合结构--RPC预制管-SWSSC组合柱(SFRPCT). 这种组合柱能有效克服 SWSSC中的盐分对构件耐久性的影响,并适用于海洋工程等高腐蚀性 环境.对12个大尺寸 SFRPCT试件和3个CFRP箍筋约束 SWSSC柱(FRPHSC)开展了轴压试 验,研究 RPC管与内部 SWSSC的组合效应及箍筋间距对轴压性能的影响.结果表明,在峰值 荷载下,RPC管表面产生大量细而密的裂缝,但保护层没有出现明显的剥落现象;SFRPCT的 轴向承载力显著高于对应的 FRPHSC,这一组合形式将 RPC 超高的抗压强度和 CFRP 箍筋的 约束效应有效结合了起来.基于相关试验数据和模型,给出 SFRPCT 组合柱的轴向承载力计算 方法,并对组合效应进行了分析,结果表明,RPC管所承担的荷载与组合柱承载力的比值在 0.39~0.42之间.

关键词:海水海砂混凝土;活性粉末混凝土(RPC);纤维增强复合材料(FRP);柱;组合效应 中图分类号:TU398.9 文献标志码:A

Compression Performance of Seawater and Sea Sand Concrete Filled RPC Tube Composite Columns under Axial Load

SHAN Bo^{1,2†}, WANG Zhihong¹, XIAO Yan³, LAI Dade¹

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency(Hunan University) of the Ministry of Education, Changsha 410082, China;

 $\mbox{2. Key Laboratory for Green \& Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology }$

of Hunan Province, Changsha 410082, China;

3. Zhejiang University-University of Illinois Institute, Zhejiang University, Haining 314400, China)

Abstract: An innovative composite structure, named seawater and sea sand concrete (SWSSC) filled reactive powder concrete (RPC) tube (SFRPCT), was presented in the paper. In the hybrid system, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) hoops are arranged in prefabricated RPC tube and then SWSSC is cast in tube. From the material durability point of view, SFRPCT has excellent corrosion resistance and it can be potentially applied in marine construction. A total of 15 large-scale columns were conducted under axial compression test, including 12 SFRPCT specimens and 3 CFRP hoops confined SWSSC (FRPHSC) specimens. Composite effect between RPC tube and

^{*} 收稿日期:2019-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678228,U1806225),National Natural Science Foundation of China(51678228,U1806225) 作者简介:单波(1976一),男,湖南益阳人,湖南大学副教授,工学博士

[†]通讯联系人,E-mail:supershanb@hnu.edu.cn

internal SWSSC and influence of mechanical properties from lateral confinement level were investigated in test. The results showed that only slight crack on RPC tube of SFRPCT column occurred without any spalling when axial load approached its peak value. Compressive strength and ductility of the SFRPCT columns were significantly higher than those of the corresponding FRPHSC specimen and increased with the increase of the volumetric hoop ratio in RPC tube. Therefore, SFRPCT hybrid system effectively combined the super-high strength of RPC and confinement effect by CFRP hoops. Based on existing test data and model, a calculation method for carrying capacity of SFRPCT was proposed. Contribution ratio of RPC tube for carrying capacity of SFRPCT columns was quantified and its value varied from 0.39 to 0.42.

Key words: seawater and sea sand concrete; reactive powder concrete (RPC); fiber reinforced polymer(FRP); column; composite effect

随着经济的发展,基础设施建设对混凝土的需求量逐年增大.据统计,2016年全世界水泥产量达到42亿吨,折算成混凝土不少于100亿立方米^[1].混凝土的生产需要消耗大量的淡水和河砂等自然资源,给环境造成巨大的负担.因此,利用海水、海砂等丰富的海洋资源替代淡水和河砂拌制混凝土,日益受到关注.现有研究表明,海水海砂混凝土(seawater and sea sand concrete,SWSSC)具有与普通混凝土类似的力学性能^[2-3].因此,对于缺乏淡水和河砂资源的国家或地区,采用SWSSC进行基础设施建设具有很强的吸引力,特别是用于岛礁工程建设中,可有效解决由大宗原材料长距离运输所导致的建设成本过高问题^[4].

SWSSC中含有大量盐分,会引起钢筋的锈蚀,造 成严重的耐久性问题^[9],因此,普通钢筋不能用于 SWSSC,需要采用其他耐腐蚀性强的增强材料替代 普通钢筋.纤维增强塑料(fiber reinforced polymer, FRP)具有高的强度-质量比和突出的耐腐蚀能力, 被认为是替代普通钢材的理想材料^[9].另外一种受到 关注的材料是不锈钢.当FRP和不锈钢与SWSSC结 合起来用于受压构件时,一种非常有效的方式是将 FRP与不锈钢制成管材,内部填充SWSSC,形成约束 组合柱,如FRP管-SWSSC组合柱、不锈钢管-SWSSC组合柱.一些学者对这两类组合柱开展了初 步研究^[7-9].结果表明,这两类组合柱的轴向承载能力 高、延性好,适用于海洋工程建设.

然而,这些组合柱在性能上存在不足.对于 FRP 管-SWSSC 组合柱,由于 FRP 中的树脂是温度敏感 性材料,其玻璃态转换温度较低,因此,该组合柱不 适合用于高温环境^[10-11].此外,相关加速试验结果显 示,当 FRP 长期处于海水中时,抗拉强度的退化不能 忽视^[12-13].对于不锈钢管-SWSSC 组合柱,一方面钢 材本身不耐火,导致组合柱的抗火性能较差^[14-15],另 一方面,不锈钢管的价格昂贵,这也是其实际应用中 一个不可忽视的问题^[7].

活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC) 是一种超高性能混凝土,是具有超高抗压强度、高耐 久性以及高韧性的新型水泥基复合材料^[16-17]. RPC 抗 氯离子渗透和耐硫酸盐腐蚀的能力极为突出,适用 于海洋工程^[18]. 实际使用中,一般采用加热养护以促 进 RPC 强度的快速发展^[19]. 此外,考虑到 RPC 的材 料价格相对较高,如制成实心受压构件,其承载力很 可能由刚度控制^[20],材料性能得不到充分发挥. 因此, 在实际工程中, RPC 一般以预制薄壁构件及组合构 件为主^[21].

基于研究现状及 RPC 的特点,本文提出一种新型 SWSSC 组合柱:RPC 预制管-SWSSC 组合柱(SWSSC filled RPC tube,简称 SFRPCT),其基本结构如下:将 RPC 预制成配置 FRP 封闭箍筋的薄壁管,施工时在内部浇注 SWSSC,形成组合柱.为进一步提高预制管的耐久性,选用不锈钢钢纤维替代普通钢纤维配置 RPC.在这一组合体系中,一方面,RPC 管中的 FRP 封闭箍筋对内部 SWSSC 提供了有效侧向约束,组合柱具有高承载力与高延性;另一方面,RPC 管具有一定的厚度、超高的抗压强度和良好的变形能力,能与内部 SWSSC 共同工作,直接承受相当部分的轴向荷载,对承载力有显著贡献^[22].

与上述两类组合柱相比,SFRPCT具有显著优势:相比于FRP管-SWSSC组合柱,RPC能有效地保护其内部的FRP箍筋,SFRPCT的长期性能和抗高

温性能明显优于 FRP 管-SWSSC 组合柱;相比于不 锈钢管,RPC 管本身具有成本优势和更好的抗火性 能^[23].此外,RPC 管与 SWSSC 同为水泥基材料,物理 特征相似,从材料层面改善了钢管混凝土柱中管壁 与混凝土脱空问题.施工过程中,RPC 管可作内部混 凝土的永久模板,还能作为施工支撑体系的一部分, 具有与钢管混凝土类似的施工便利性.

本文进行了 15 根大尺寸试件的单轴抗压试验, 探讨 SFRPCT 的组合效应与承载力计算方法,为组 合柱的深入研究与应用提供基础性数据.

1 试验设计

1.1 试件设计

本试验采用直径 6 mm 的碳纤维增强塑料 (CFRP)筋作为 RPC 管内的封闭箍筋,对 4 组不同箍 筋间距的 SFRPCT 试件和 1 组 CFRP 箍筋约束 SWSSC(CFRP hoops confined SWSSC,简称 FRPHSC) 大尺寸试件进行轴向抗压试验,每组 3 个试件. 各组 试件的基本参数见表 1. 表 1 中,*s* 为箍筋间距, ρ_{ϵ} 为 体积配箍率, $f'_{\text{re.co}}$ 为 RPC 轴心抗压强度, $f'_{\text{sw.co}}$ 为 SWSSC 轴心抗压强度, N_u 为试件抗压承载力. 试件 编号前一部分表示试件类型,其中,SFR 代表 RPC 管-SWSSC 组合柱 (SFRPCT),FRPH 代表 CFRP 箍 筋约束 SWSSC 组合柱(FRPHSC);后一部分表示箍 筋间距,例如 SFR-20 表示箍筋间距为 20 mm 的 RPC 管-SWSSC 组合柱.

SFRPCT 试件的基本尺寸如图 1 所示. RPC 管的 外径 *D* 为 300 mm,高为 600 mm,内径 *d* 为 250 mm, 壁厚 *t* 为 25 mm,在管壁的中间厚度位置(*t*/2)处配置 CFRP 封闭箍筋.设置了 4 根直径为 3 mm 的纵向 CFRP 筋做架立筋,不考虑其轴向承载能力^[24].

表 1 试件设计参数及部分试验结果 Tab.1 Test matrix and partial results

试件编号	s/mm	$ ho_{ m v}/\%$	$f'_{\rm npc, \infty}/{ m MPa}$	$f'_{\rm sw,co}/{\rm MPa}$		$N_{ m u}$ /	/kN		$N_{ m rpc}/{ m kN}$	$N_{\rm sw}/{ m kN}$
SFR-20	20	2.06	135.3	43.6	5 331	5 667	5 539	5 512	2 165	3 347
SFR-40	40	1.03	132.0	44.3	4 990	5 126	5 018	5 045	1 974	3 071
SFR-60	60	0.69	133.0	43.0	4 585	4 780	4 479	4 615	1 855	2 760
SFR-80	80	0.51	135.3	42.3	4 303	4 115	4 293	4 237	1 791	2 446
FRPH-20	20	2.06	-	43.2	4 433	4 311	4 380	4 375	—	_

注:N_{ne}、N_{sw}分别为组合柱中 RPC 管所承担的轴向荷载与内部 SWSCC 所承担的轴向荷载.



Fig.1 Schematic of typical cross section of SFRPCT

FRPH-20 为对比柱,其外形尺寸、配筋及 SWSSC 均与 SFR-20 完全相同.

1.2 试件制作

1.2.1 材料性能

CFRP 箍筋直径为 6 mm,由工厂通过拉挤成型 工艺生产,并采用环氧树脂黏接形成封闭箍,如图 2 (a)所示,搭接段长度为 120 mm,如图 2(b)所示.其 母材拉伸强度 *f*_m为 1 801 MPa,弹性模量 *E*=130 GPa,极限伸长率 δ_{frp} = 1.39%.

RPC 原材料的基本情况如下:水泥为 52.5 的硅酸盐水泥(P·I);粉煤灰为 II 级灰,比表面积为 615 m²/kg(经磨细处理);硅灰平均粒径为 0.1 μm;石英砂规格为 350~833 μm(20~40 目);石英粉规格为 47 μm(325 目);聚羧酸高性能减水剂(粉剂);不锈钢纤维,直径为 0.2 mm,长度为 13 mm. 配合比为:V_{水泥}: V_{粉煤灰}:V_{硅灰}:V_{石英砂}:V_{石英砂}:V_{石英粉}:V_{水液}:V_{粉煤灰}:V_{砖联}:V_{石英砂}:V_{石英砂}:V_{石英粉}:V_{不锈钢钢纤维}= 1.0:0.1:0.25:1.1:0.1:0.015:0.02,水胶比为 0.18. 在 90 °C 热水养护 48 h 后,100 mm 立方体抗压强度为 153.8 MPa.



(a) 箍筋整体
 (b)搭接段
 图 2 CFRP 封闭箍筋
 Fig.2 CFRP circular hoop

SWSSC 的设计强度等级为 C50, 原材料的基本 情况为:水泥为 42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料为最大 粒径为 25 mm 的碎石;细骨料为天然海砂,细度模数 为 2.84. 采用人工海水拌制混凝土,其离子质量浓度 参照文献[4]配制,见表 2. 混凝土配合比为: *V*_{水泥}: *V*_{碎石}: *V*_{海砂}: *V*_{人工海水} = 1:2.35:1.15:0.38. 标准养护的立 方体抗压强度为 55.7 MPa.

表 2 人工海水组成 Tab.2 Chemical composition of the artificial seawater

1 4012	enenneur composi	tion of the ut thicker seuwater					
离子成分	质量浓度/(g·L-1)	离子成分	质量浓度/(g·L-1)				
K^*	0.463	Cl-	21.629				
Na^{+}	11.903	SO4 ²⁻	2.481				
Ca ²⁺	0.345	CO32-	0.517				
Mg^{2+}	1.617	HCO3 ⁻	0.103				

1.2.2 组合柱制作

RPC 预制管在实验室由人工制作,基本步骤为: 扎带扎制 CFRP 箍筋笼,如图 3(a)所示;将箍筋笼放 入定制钢模内,并浇筑 RPC,如图 3(b)所示;室内静 置 48 h 后拆模,并置于 90 ℃热水养护 48 h,成型的 RPC 管如图 3(c)所示; RPC 预制管作为外模,在管 内浇筑 SWSSC 形成组合柱,待混凝土硬化后,用聚 合物砂浆对组合柱的顶面进行修补,得到平整的受 压面,如图 3(d)所示.





(c)顶制官
 (d)修补后
 图 3 试件制作过程
 Fig.3 Prefabricated process of specimens

1.3 测量方案与加载制度

为测量箍筋的应变,在 RPC 管浇筑前,选择试件中部的2圈箍筋,每圈表面粘贴4个长度为3mm的应变片(H1~H4、H5~H8). 抗压试验前,在 RPC 管表面的对应位置,轴向粘贴4个纵向应变片(A1~A4),主要用于加载初期的对中,如图4所示.在试件的中部安装一个轴向变形测试架,设有两个高精度的位移传感器(LVDT),以准确测量试件在整个试验过程中的轴向变形.

加载设备为 10 000 kN 的电液伺服压力试验机, 加载制度为:开始阶段,采用力控制,加载速率为 5 kN/s; 当荷载达到预估极限荷载 90%时改为位移加载,加载速率为 0.1 mm/min,直至试件失去承载能力.



Fig.4 Instrumentation details

2 试验结果

2.1 破坏形态

对比试件 FRPH-20 为 CFRP 箍筋约束 SWSSC 组合柱,加载至峰值荷载的 65%左右,试件中上部出 现细微的竖向裂缝,随着荷载的增加,裂缝宽度迅速 增大;当达到峰值荷载的 85%左右时,试件表面开裂 现象严重,保护层开始剥落;达到荷载峰值时,保护 层大面积剥落,CFRP 箍筋外露,如图 5(a)所示.此后,在承载力下降过程中,保护层混凝土完全剥落, 箍筋断裂,导致试件破坏,如图 5(b)所示.

SFRPCT 试件破坏模式基本类似,以 SFR-20 为例,加载至峰值荷载的 85%左右,在 RPC 管中部开始出现几条细小的横向裂缝和斜裂缝,并随着荷载增加不断发展;达到荷载峰值时,RPC 管表面有大量细而密的裂缝,但没有出现剥落现象,如图 6(a)所示;随后,随着荷载缓慢下降,RPC 管表面裂缝持续扩展并连通,在中部附近形成一条主纵向裂缝并向端部延伸,钢纤维不断被拔出;最后,CFRP 箍筋陆续断裂,而 RPC 管依然没有出现明显的剥落现象,如 图 6(b)所示.



(a)峰值荷载下
 (b)最终形态
 图 5 FRPH-20 破坏形态
 Fig.5 Failure mode of FRPH-20





(a) SFR-20 峰值荷载下







(c)SFR-40 (d)SFR-60 (d) 图 6 SFRPCT 破坏形态 Fig.6 Failure modes of SFRPCT

对于其他 SFRPCT 试件,随着箍筋间距的增大, 试件破坏时的裂缝宽度有所增大,而裂缝数量相应 减少,如图 6(c)(d)(e)所示.

2.2 轴压结果分析

2.2.1 轴压承载力

轴压承载力的试验结果汇总于表 1 中. 可以看出,SFRPCT 的承载力随着 RPC 管中箍筋间距的减小而增大,且箍筋越密,增长幅度越大,可见箍筋间距对轴向抗压承载力的影响较大.

在配箍相同的情况下,SFR-20的承载力要显著 高于对比柱 FRPH-20. 主要原因有两个:一方面, RPC 具有超高的抗压强度,因而 RPC 管的承载力高 于对应面积的 SWSSC;更为重要的是,RPC 管在峰 值荷载下裂而不散,维持了其整体性,能有效承担轴 向荷载,而对比柱的混凝土保护层在达到荷载峰值 前已出现严重的剥落现象,对承载力没有贡献.这表 明 RPC 超高的抗压强度和 CFRP 箍筋的约束效应可 以形成协同效应,提高组合柱的承载力.

2.2.2 荷载-轴向应变曲线

图 7 给出了各组试件荷载-轴向应变平均曲线. 对于 SFRPCT 试件,荷载作用初期,曲线呈线性且基本重合;进入弹塑性阶段后,随着箍筋间距减小,试件的峰值荷载和峰值应变越大,曲线的弹塑性阶段越长,曲线的下降段随箍筋间距的减小而趋于平缓. 这主要是因为 CFRP 箍筋越密,对 SWSSC 的侧向约束作用越强,强度和延性也越好.此外,曲线下降段 有一定的波动,这主要是由于钢纤维被拔出及 CFRP 箍筋断裂导致的,荷载突变点对应于箍筋断裂发生 点.随着箍筋间距减小,箍筋的断裂次数增加,且每次断裂造成的承载力降低幅度也更小,显示出组合 柱破坏前具有明显的征兆.



FRPH-20的荷载-轴向应变曲线形状与 SFR-20类似,但前者曲线的初始斜率明显偏低.这主要是由于 RPC 管具有较高的弹性模量,提高了组合柱的初始刚度,表明 RPC 管在荷载作用初期就能有效承担轴向荷载.与此相对应,在 CFRP 箍筋开始产生有效的约束应力时(对应于弹塑性段的起点),SFR-20的荷载显著高于 FRPH-20,此后,两条曲线的差距不断增大,这显示 RPC 管在受力的全过程都对组合柱的轴向承载能力有显著贡献.

2.2.3 荷载-箍筋应变曲线

荷载-箍筋应变曲线如图 8 所示. 对于 SFRPCT

试件,加载初期,各组试件的荷载-箍筋应变曲线基本重合,箍筋的应变水平都很低;到峰值荷载的85% 左右时,曲线斜率开始发生变化,此时箍筋应变在250µs左右,这与 RPC 的开裂应变基本一致^[20],表明 CFRP 箍筋在预制管开裂前基本没有产生约束作用.

此后,箍筋应变显著增大,显示出箍筋开始发挥 其约束效应,直到试件破坏.此外,箍筋间距对箍筋 应变发展有显著影响,箍筋间距越小,箍筋的极限应 变也越大,但都显著小于 CFRP 筋材拉伸试验测得 的极限应变,其比值在 29%~57%之间,与其他研究 者报道的结果相吻合^[25].



Fig.8 Load-hoop strain responses on hoops

与 SFR-20 相比较, FRPH-20 的箍筋应变发展 更快,即在荷载相对较低时箍筋应力更大.主要是 FRPH-20 的保护层在加载的前期就出现开裂、剥落, 迅速退出工作,导致轴向应力增长加快、横向变形增 大,因而箍筋的应力水平更高.这从侧面证明了 RPC 管对轴向承载力的有效贡献.

2.2.4 刚度与延性

表 3 给出了各组试件的主要力学指标平均值. 组合柱的极限点定义为荷载下降到峰值荷载 80%所 对应的点,该点的应力和应变分别为极限应力 σ_u 和 极限应变 ε_u .表 3 中, σ_c 与 ε_c 分别表示峰值应力与 峰值应变; ε_c ,为属服应变,根据等能量法计算得到,如 图 9 所示^[26];刚度 E_s 为曲线直线段斜率;用延性系数 μ 来表征试件的变形性能,定义为 $\mu = \varepsilon_u / \varepsilon_y$.

由表 3 可见,对于 SFRPCT 试件,刚度 E_s 与配箍 率基本无关;而峰值应力、峰值应变、极限应力与极 限应变,都随着配箍率的提高而增大;此外,组合柱 的延性系数μ也随配箍率的提高而增大,这表明更 强的侧向约束,对提高 SFRPCT 的承载力和变形能 力都有显著作用.

表 3 各组试件力学性能 Tab.3 Mechanical properties of each group

试件编号	$\sigma_{ m cc}$ /MPa	$arepsilon_{\infty} \ \%$	$\sigma_{ m u}$ /MPa	$arepsilon_{ m u} \ /\%$	$arepsilon_{y}$ /%	μ	E _s /GPa	ε _{cc,frp} /10 ⁻⁶
SFR-20	77.98	0.743	62.39	3.972	2.10	6.69	40.34	4 339.4
SFR - 40	71.37	0.580	57.09	2.886	1.42	5.44	39.37	3 114.8
SFR - 60	65.28	0.283	52.23	1.856	0.73	3.59	39.58	972.2
SFR -80	59.95	0.220	47.96	0.839	0.41	2.18	38.92	892.0
FRPH-20	61.89	0.721	49.51	3.684	1.65	4.92	29.97	3 953.8



相比于 SFR-20,FRPH-20 的刚度 *E*,和延性系数 *μ* 分别下降了 26%和 27%,差别显著. SFRPCT 具有更高的刚度,与 RPC 具有较高的弹性模量有关,这对于减少组合柱在正常使用过程中的变形有积极作用. SFRPCT 的延性提高,也得益于 RPC 具有优异的变形能力.试验结果证明,RPC 管对组合柱的强度、刚度、变形能力均具有显著的贡献,在组合柱的

3 轴向承载力预测

设计中,其作用不可忽视.

SFRPCT 组合体系中,内部 SWSSC 的侧向约束 来源于 CFRP 箍筋,因此,从约束实质上来看,其属 于箍筋约束混凝土. Mander 模型是在试验基础上提 出的一个钢筋约束混凝土短柱的经典模型^[27-28]. 在该 模型中,箍筋提供的侧向约束力沿柱轴向分布不均 匀,在箍筋之间的中间截面处最小,且该截面分为有 效约束区和非有效约束区,如图 10 所示. 该模型不 考虑箍筋中心线以外的混凝土对轴向承载力的贡 献,混凝土的抗压强度 f.。按式(1)计算.

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_{l}^{'}}{f_{co}^{'}}} - 2 \frac{f_{l}^{'}}{f_{co}^{'}} \right)$$
(1)

式中:f_c为混凝土的轴心抗压强度;f_i为箍筋提供的 有效约束应力,按式(2)和式(3)计算.

$$f_l' = k_{\rm e} f_l \tag{2}$$

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_v f_y \tag{3}$$

式中: k_e 为有效约束系数, $k_e = \frac{A_e}{A_{cc}}$; f_l 为箍筋侧向压 应力; f_y 为箍筋屈服强度; $A_{ex}A_{cc}$ 分别为核心混凝土 有效约束面积与箍筋形心所包围混凝土面积, $A_e = \frac{\pi}{4} \left(d_s - \frac{s'}{2} \right)$, $A_{cc} = \frac{\pi}{4} d_s^2$, d_s 为箍筋中线直径,s'为箍 筋间净距; ρ_s 为箍筋体积配箍率.



Fig.10 Effective confined core

Afifi 等对 CFRP 筋约束混凝土开展了抗压试验^[24-25],结果表明,由于 CFRP 箍筋与钢筋的力学性能存在显著差异,Mander 模型不能直接套用于CFRP 箍筋约束混凝土.实际上,Mander 模型是基于William-Warnke 五参数破坏准则所提出的^[29],该模型一般表达式如下^[25,27]:

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'} \left[\frac{3(b_{1} + \sqrt{2})}{2b_{2}} + \sqrt{\left[\frac{3(b_{1} + \sqrt{2})}{2b_{2}} \right]^{2} - \frac{9b_{0}}{b_{2}} - \frac{9\sqrt{2}}{b_{2}} \frac{f_{l}^{'}}{f_{co}} - 2\frac{f_{l}^{'}}{f_{co}} \right]}$$
(4)

式中: b_0 、 b_1 、 b_2 均为待定参数,根据试验数据确定.Afifi等^[25]基于试验结果,所确定的参数为: b_0 = -0.159, b_1 = -2.541, b_2 = -1.994,则 CFRP 箍筋约束 混凝土的强度计算公式见式(8).

$$f_{cc} = f_{co}' \left(0.85 + \sqrt{6.38 \frac{f_i'}{f_{co}'}} - 2 \frac{f_i'}{f_{co}'} \right)$$
(5)

在 Afifi 模型中, FRP 箍筋的侧向压应力 f_i , 按式 (6)计算, 需考虑弯曲对 FRP 筋强度的影响^[30].

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_{\rm s} f_{\rm fp,b} \tag{6a}$$

$$f_{\rm frp,b} = \left(0.05 \frac{r_{\rm b}}{d_{\rm b}} + 0.3 \right) f_{\rm frp} \le f_{\rm frp}$$
 (6b)

式中: f_{fm} 为直 FRP 筋测得的抗拉强度; f_{fm,b} 为 FRP 筋 弯曲后的强度; r_b 为箍筋的弯曲半径; d_b 为箍筋直径. 与 Mander 模型相同, Afifi 模型也不考虑箍筋中心线 以外的混凝土对组合柱轴向承载力的贡献.

采用上述两个模型对试验柱的轴向承载力进行 预测,得到承载力的计算值 N_u,与试验值 N_u的比如 图 11 所示(图中"本文模型"详见下节). 对于 Mander 模型, 在箍筋间距较小时, 显著高估了 SFRPCT 的轴 向承载力; 而在箍筋间距较大的情况下, 该模型又低 估了组合柱的承载力. 对于 Afifi 模型, SFRPCT 承载 力的预测值均小于试验值, 其误差随着箍筋间距的 增大呈逐步增加的趋势, 其主要原因应该与该模型 不考虑箍筋中心线以外 RPC 管对轴向承载力的贡 献有关. 因此, 两个模型均不适用于 SFRPCT 组合体 系, 必须提出新的承载力计算方法.



图 11 各模型计算值与试验值之比 Fig.11 Ratio of the calculated value and the test value

4 组合效应分析

4.1 SFRPCT 承载力计算方法

如图 10 所示, RPC 管以箍筋中心线(t/2)为界, 可分为外壁和内壁,其中,外壁为非约束区,而内壁 的受力相对复杂,可能同时存在非有效约束区与有 效约束区,这与箍筋间距和管壁厚度有关.考虑到 RPC 为薄壁管,在试验范围内,即使少数试件的部分 管壁处于有效约束区,其所占比例也很有限,为简化 问题,将 RPC 管作为整体看待,整个截面的轴向承 载力分为 RPC 管与内部 SWSSC 两者所承担的轴向 荷载之和:

$$N_{\rm u} = N_{\rm sw} + N_{\rm rpc} \tag{7}$$

$$N_{\rm sw} = A_{\rm sw} f_{\rm sw,cc} \tag{8}$$

$$N_{\rm rpc} = A_{\rm rpc} f_{\rm rpc, re} \tag{9}$$

式中: N_u 为轴向承载力; N_{sw} 为SWSSC所承担的荷 载; N_{ne} 为RPC管所承担的荷载; A_{sw} 为SWSSC截面 积; $f_{sw.ee}$ 为CFRP箍筋约束SWSSC强度; A_{ne} 为RPC 管截面面积; f_{mere} 为峰值荷载下RPC管的剩余强度.

刘志^[31]对配有高强螺旋箍筋的 RPC 预制管混凝 土组合短柱(CFRT)的单轴抗压性能进行了试验与 分析,根据其研究结果,可获得 RPC 管剩余强度比 $f_{pe.ne}/f_{pe.ce} = \rho_v$ 的关系: (10)

$$f_{\rm rpc,re}^{'}/f_{\rm rpc,co}^{'} = 0.551 + 13.721 \rho_{\rm v}$$

考虑到本文 SFRPCT 试件与上述 CFRT 试件具 有相似的组合方式,且管壁厚度相同、配箍率接近, 故推测 RPC 管的受力状态很接近.基于此,假定公 式(10)也适用于 SFRPCT,则 *N*_{rpc} 可基于配箍率 *ρ*,计 算得到,进而从组合柱的承载力 *N*_u 中减去 *N*_{rpc},推定 出内部 SWSSC 的承载力 *N*_w,以上数据均列于表 1.

基于表 1 中 N_{sw} 的结果,对 Mander 模型的一般 表达式(4)进行拟合,结果如图 12 所示,获得参数 为: $b_0 = -0.829$, $b_1 = -5.616$, $b_2 = -5.379$.则内部 SWSSC 的强度 $f_{sw,ce}$ 计算公式如下:

$$f_{\rm sw,cc} = f_{\rm sw,co} \left(1.172 + \sqrt{-0.014 + \frac{2.367f_l}{f_{\rm sw,co}}} - 2\frac{f_l}{f_{\rm sw,co}} \right)$$
(11)

需要说明的是,式(11)中,CFRP 箍筋提供的侧 向压应力 f_i 由式(6a)计算确定,其中,CFRP 筋的抗 拉强度 f_{fp,b} 取峰值荷载下 CFRP 箍筋的实际应力,按 式(12)计算,这样更加符合实际约束状态.

 $f_{\rm frp,b} = E \cdot \varepsilon_{\rm cc, frp} \tag{12}$

式中: $\varepsilon_{\alpha, frp}$ 为峰值荷载下的 CFRP 筋的实际拉伸应变,见表 3.



因此,基于公式(10)和公式(11),建立了 SFR-PCT 的轴向承载力的计算方法,模型计算结果与试 验结果的比也在图 11 中给出,二者吻合程度较高. 应该注意到,对于 SFRPCT 试件,由于模型推导与验 证均采用同一试验结果,为循环自证过程,因此,并 不能说明该方法的准确性.此外,可以看到,对比柱 FRPH-20 的预测结果与测试结果的误差约为 10%, 在一定程度上可以接受,考虑到这一数据不属于循 环自证范围,这间接反映了该方法具有一定的合理 性.然而,相比于 Afifi 模型,该方法的预测偏差增大 了约 1 倍,这表明 SFRPCT 的受力特征与普通 FRP 箍筋约束混凝土柱在性能上存在差别.换言之,在本 文模型中直接采用 Afifi 模型估算组合柱内部 SWSSC 的强度并不合适. 必须强调的是,该计算方法 中对于 RPC 管剩余强度 f⁻_{pe.re} 的确定,是直接采用钢 筋约束的 CFRT 抗压研究成果的经验公式,其适用 性及准确性需要设计相应试验,开展进一步的验证.

4.2 RPC 管承载力贡献

按本文提出的承载力计算方法,可以获得 N_{пpc.eo} (按 RPC 轴心受压强度 f_{ipc.eo}计算)和 N_{npc}(按剩余强度 f_{ipc.ee} 计算)分别与总承载力之比(贡献率),如图 13 所 示.可以看到损伤降低了 RPC 管对组合柱轴向承载 力的贡献,其影响较为显著.再者,贡献率随箍筋间 距的增大而小幅增长,但变化幅度不大.本文试验 中,RPC 管对轴向承载力的贡献率为 0.39~0.42,平 均值为 0.40,相当显著.这表明整个 RPC 管对于 SFRPCT 组合柱的轴向承载力贡献不可忽略.



Fig.13 Carrying capacity ratio of RPC-tube and SFRPCT

5 结 论

本文提出了一种新的约束混凝土组合柱--RPC 预制管-海水海砂混凝土组合柱(SFRPCT),并对 12 个大尺寸 SFRPCT 试件与 3 个对比试件开展了轴压 试验,得出的主要结论如下:

1)在受压过程中,由于钢纤维的桥接作用,RPC 管裂而不散,维持了其完整性,有效避免了 SFRPCT 在峰值荷载下的保护层剥落现象,是 RPC 管能与内 部 SWSSC 协同受力的基础.

2)SFRPCT 试件的承载力显著高于对应的 FRPHSC 试件,表明在这一组合体系中,基于约束组 合效应,实现了 RPC 超高的抗压性能和 CFRP 抗拉 性能的有效结合.

3)基于相关试验数据及修正 Mander 模型,提出 了 SFRPCT 的轴向承载力计算方法,并分析了其组 合效应.结果表明,RPC 管对组合柱承载力的平均贡 献为 0.40,相当显著. 4)SFRPCT 组合柱从材料层面克服了 SWSSC 所 带来的腐蚀性问题,具有良好的抗压性能,扩展了 SWSSC 的应用范围,在海洋工程中应用前景良好.

本文仅对 SFRPCT 的轴心抗压性能与组合效应 进行了初步研究,下一步需要对 FRP 箍筋的种类、 RPC 管壁厚度等更广泛的参数开展试验研究,重点 研究采用变形能力高、价格低的玻璃纤维增强塑料 (GFRP)和玄武岩纤维增强塑料(BFRP)作为箍筋的 影响.此外,有必要对这一组合体系的抗侧力性能与 耐久性能开展试验研究.

参考文献

- XIAO J Z,QIANG C B,ANTONIO N, et al. Use of seasand and seawater in concrete construction: current status and future opportunities [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 1101-1111.
- [2] YANG E I, KIM M Y, PARK H G, et al. Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (5): 758-765.
- [3] 刘伟,谢友均,董必钦,等.海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报,2014,33(1):15-22.
 LIU W,XIE Y J,DONG B Q,et al. Study on the characteristics of dredged marine sand and the mechanical properties of concrete made with dredged marine sand [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2014,33(1):15-22. (In Chinese)
- [4] WANG J, FENG P, HAO T Y, et al. Axial compressive behavior of seawater coral aggregate concrete –filled FRP tubes [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147:272–285.
- [5] DIAS W P S, SENEVIRATNE G A P S N, NANAYAKKARA S M A. Offshore sand for reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(7): 1377–1384.
- [6] PIMIENTA P, CHANVILLARD G. Retention of the mechanical performances of ductal specimens kept in various aggressive environments [C]// FIB Symposium, Avignon, Spain, 2004:26–28.
- [7] LI Y L, ZHAO X L, SINGH R K R, et al. Tests on seawater and sea sand concrete – filled CFRP, BFRP and stainless steel tubular stub columns [J]. Thin–Walled Structures, 2016, 108:163–184.
- [8] LI Y L,ZHAO X L,SINGH R K R, et al. Axial compression tests on seawater and sea sand concrete-filled double-skin stainless steel circular tubes [J]. Engineering Structures, 2018, 176:426–438.
- [9] LI Y L, TENG J G, ZHAO X L, et al. Theoretical model for seawater and sea sand concrete –filled circular FRP tubular stub columns under axial compression [J]. Engineering Structures, 2018, 160: 71-84.
- [10] 吴智深,汪昕,吴刚. 面向重大工程应用 FRP 若干核心研究问题 [CJ// 第七届全国建设工程 FRP 应用学术交流会论文集. 北京: 工业建筑杂志社,2011:38-57.
 WU Z S,WANG X,WU G. Key research issues of FRP towards applications in large -sized and important structures [CJ// Proceedings of 7th national conference on FRP composites in infrastructure in Infrastructure (Supplementary Issue of Industrial Construction) Beijing:Industrial Construction Magazine Agency, Beijing:Industrial construction,2011:38-57. (In Chinese)
- [11] AL -SALLOUM Y, ELSANADEDY H, ABADEL A. Behavior of FRP -confined concrete after high temperature exposure [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2):838-50.

WANG Z K. Study on the durability performances of fiber reinforced polymer (FRP) bars exposed to simulated seawater and sea sand concrete pore solution [D]. Harbin: College of Civil Engineering,

Harbin Institute of Technology, 2018:2-12. (In Chinese)

- [13] HONG B,XIAN G J,LI H. Comparative study of the durability behaviors of epoxy- and polyurethane-based CFRP plates subjected to the combined effects of sustained bending and water/seawater immersion [J]. Polymers, 2017, 9(11):603.
- [14] YANG H,HAN L H,WANG Y C. Effects of heating and loading histories on post-fire cooling behavior of concrete -filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008,64(5):556-570.
- [15] 钟善桐.钢管混凝土结构[M].北京:清华大学出版社,2003:1-33,420-464.

ZHONG S T. Concrete-filled steel tubular structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 1–33, 420–464. (In Chinese)

- [16] ROUX N, ANDRADE C, SANJUAN M A. Experimental study of durability of reactive powder concretes [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8(1):1–6.
- [17] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25 (7): 1501-1511.
- [18] BENJAMIN G, JUSSARA T. Durability of an ultrahigh-performance concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19 (10):848-854.
- [19] 何峰,黄政宇.养护制度对活性粉末混凝土(RPC)强度的影响研究[J].混凝土,2002(2):31-34.
 HE F,HUANG Z Y. Study on effect on curing schedule on the strength of RPC [J]. Concrete,2002(2):31-34. (In Chinese)
- [20] SHAN B,LAI D D,XIAO Y,et al. Experimental research on concrete –filled RPC tubes under axial compression load [J]. Engineering Structures, 2018, 155: 358—370.
- [21] 郑文忠,吕雪源.活性粉末混凝土研究进展[J].建筑结构学报, 2015,36(10):44-58.
 ZHENG W Z,LÜ X Y. Literature review of reactive powder concrete [J]. Journal of Building Structures,2015,36 (10):44-58. (In Chinese)
- [22] 单波,刘志,肖岩,等. RPC 预制管混凝土组合柱组合效应试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(3):88—96. SHAN B,LIU Z,XIAO Y,et al. Experimental research on composite action of concrete-filled RPC tube under axial load [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2017,44 (3):88—96. (In Chinese)
- [23] 龚建清,邓国旗,单波.活性粉末混凝土高温后超声研究及微观 分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(1):68-76.
 GONG J Q, DENG G Q, SHAN B. Ultrasonic test and microscopic analysis of reactive powder concrete exposed to high temperature [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2018,45(1): 68-76. (In Chinese)
- [24] AFIFI M Z, MOHAMED H M, BENMOKRANE B. Strength and axial behavior of circular concrete columns reinforced with CFRP bars and spirals [J]. Journal of Composites for Construction, 2014,18(2):04013035.
- [25] AFIFI M Z, MOHAMED H M, CHAALLAL O, et al. Confinement model for concrete columns internally confined with carbon FRP spirals and hoops [J]. Journal of Structure Engineering. 2015, 141 (9):04014219.
- [26] WANG L M, WU Y F. Effect of corner radius on the performance of CFRP –confined square concrete columns [J]. Engineering Structure, 2008, 30(2):493–505.
- [27] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stressstrain model for confined concrete [J]. Journal of Structure Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [28] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Observed stress-strain behavior of confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988,114(8):1827—1849.
- [29] WILLIAM K J, WARNKE E P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete [C]//Proceedings of IABSE, Structural Engineering Report 19, Section III. 1975:1–30.
- [30] ACI 440.1R-06 Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars [S]. Farming Hills, MI: ACI Committee 440, 2006:16–17.
- [31] 刘志. RPC 预制管混凝土组合柱抗震性能试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2016:24—43. LIU Z. Experimental research on seismic behavior and composite action of concrete-filled RPC tube [D]. Changsha; College of Civil Engineering, Hunan University, 2016:24—43. (In Chinese)