

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0025-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.006

## 钢管-RPC轴拉承载力试验研究

姚鹏宇, 黄文金, 应铮, 李靖

(福建农林大学交通与土木工程学院, 福建福州 350108)

**摘要:** 为了确定钢管-钢纤维活性粉末混凝土(RPC)轴拉性能, 通过共40根钢管-RPC试件的轴拉试验, 对比分析了不同养护温度、钢纤维体积掺量和钢管壁厚的钢管-RPC轴拉试件的应变增长模式和破坏机理。研究表明, 钢管-RPC轴拉荷载-应变增长模式与钢管混凝土类似; 钢管-RPC初裂荷载约为峰值荷载的25%; 钢管-RPC的轴拉极限承载力可参考钢管混凝土抗拉承载力的定义方法进行确定。

**关键词:** 钢纤维活性粉末混凝土; 组合结构; 开裂承载力; 极限承载力; 直接轴拉试验

**中图分类号:** TU37

**文献标志码:** A

## Experimental investigation on axial tensile resistant of reactive powder concrete-filled steel tube

YAO Pengyu, HUANG Wenjin, YING Zheng, LI Jing

(Collage of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fujian Fuzhou, 350108, China)

**Abstract:** In order to define the tensile behavior of reactive powder concrete-filled steel tube (RPC-FST), the strain behavior and failure modes of RPC-FST were investigated by testing a total of 40 specimens under direct tension load with different curing temperatures, steel fiber volume contents and thicknesses of steel tube. It is shown from the test that, axial tension load-strain relationship of PRC-FST is similar to that of concrete-filled steel tube (CFST); the cracking load is about 25 percent of peak load; the ultimate tensile resistant of RPC-FST can be specified by the method for CFST, which is simple and reliable, and can provide reference for engineering design.

**Key words:** steel fiber-reinforced reactive powder concrete, composite structure, cracking resistant, ultimate tensile resistant, direct tension test.

钢管-RPC是在钢管中填充RPC后形成的一种新型材料组合型式, 其具有比普通钢管混凝土更高的强度和延性, 在高层大跨结构中具有良好的应用前景<sup>[1-12]</sup>。虽然在实际工程中已经有应用钢管-RPC的趋势, 但关于其理论研究还相对滞后, 且主要集中在钢管-RPC受压性能方面<sup>[13-16]</sup>, 而关于其受拉性能方面的研究则鲜有报道。钢管-RPC和钢管混凝土在受力性能方面有很多共同点。钢管混凝土受拉性能研究表明, 影响组合截面承载力的主要因素为截面含钢率、荷载偏心率和钢材强度等<sup>[17-18]</sup>。RPC的开裂应变和极限应变比普通混凝土的大, 因

此, 本文以养护温度、钢纤维体积掺量和钢管壁厚为试验参数, 进行了三批共40根试件的钢管-RPC轴拉试验<sup>[3, 7-8, 19]</sup>, 分析了试件的破坏机理和受拉性能, 探讨钢管-RPC轴拉初裂承载力和极限承载力的确定方式。

### 1 试验概况

#### 1.1 试件设计

本试验借鉴文献[6, 17]采用的方法对试件和加载装置进行了优化设计, 将加劲肋与端板连成整

收稿日期: 2018-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008079); 福建省自然科学基金资助项目(2018J01633); 福建农林大学科技创新专项基金项目(KFA17040A, KFA17255A)

作者简介: 姚鹏宇(1992-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 主要从事组合结构研究。

体以减少焊缝数量;将试件采取中部削薄处理,以避免试件端头因焊接残余应力引起的过早失效,提高了试验的成功率;将十字型传力板改为压簧与传力端部相连的传力形式,使得钢管与RPC可以协同受力。钢管采用20#无缝钢管,市场上所售钢管壁厚为5 mm,不满足试验需求,本试验采用车床削薄处理,并以此来控制钢管壁厚的变化。钢管和端板的具体构造见图1。

传力装置由高强螺栓连接加载板和焊接在试件上的盖板组成。上下加载板厚度均为50 mm,长宽分别为216 mm×280 mm。选用螺栓为 $\Phi 22$  mm的10.9级高强螺栓,加载板由两排共6个 $\Phi 24$  mm的螺栓孔和1个 $\Phi 70$  mm的夹头组成。加载板具体构造见图2,试件参数见表1。

## 1.2 材料属性

文献[3,8]采用的钢管屈服强度为286 MPa,极限强度为467 MPa;文献[9]采用的钢管屈服强度为285 MPa,极限强度为466 MPa。弹性模量均为199 GPa;泊松比均为0.3。

文献[3,8-9]中RPC的配合比均相同,其水泥:硅灰:细沙:减水剂各组分质量比为1:0.3:1.2:0.025,水胶比为0.18,钢纤维为直线型冷拔钢丝纤维,公称直径为0.2 mm,公称长度为13 mm,抗拉强度不小于2 000 MPa,弹性模量为200 GPa,RPC的材料属性见表2。

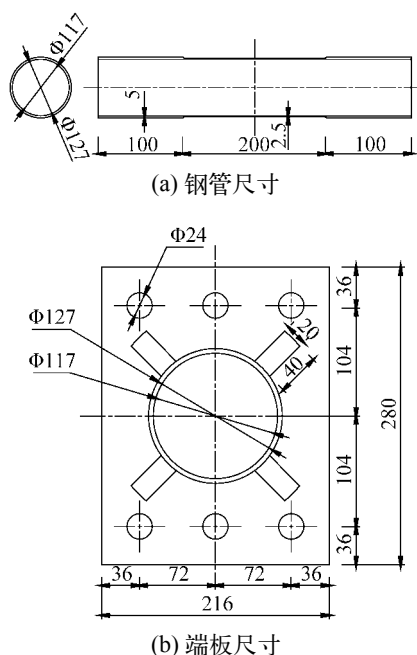


图1 试件设计图(单位:mm)  
Fig.1 Configuration of specimen

## 1.3 试验加载

试验在2 000 kN的电液伺服万能试验机上进行,试验加载、测量装置和应变片布置见图3。试件安装时,首先进行几何对中,然后进行3次预加载,消除夹头与试验机之间的滑移。试验采用位移加载控制,加载过程中保持加载速率0.01 mm/s,直至试件破坏。

## 2 试验现象及结果分析

### 2.1 试件破坏模式

由于中部削薄段钢管壁厚较薄,故钢管的开裂位置在削薄段无疑是试验成功的表现,有38根即95%的试件的破坏模式为削薄段钢管开裂,2根试件表现为夹头破坏。钢管-RPC轴拉试件的破坏模式见图4。

不含钢纤维的试件,管内RPC在钢管开裂处产生主裂缝,沿钢管轴向产生少而宽的裂缝。含钢纤维的试件,管内RPC在钢管开裂处产生主裂缝,沿钢管轴向产生多而密的裂缝。这是由于钢纤维能够持续承受拉力并抑制裂缝开展,阻止贯通缝形成,并减小裂缝宽度。

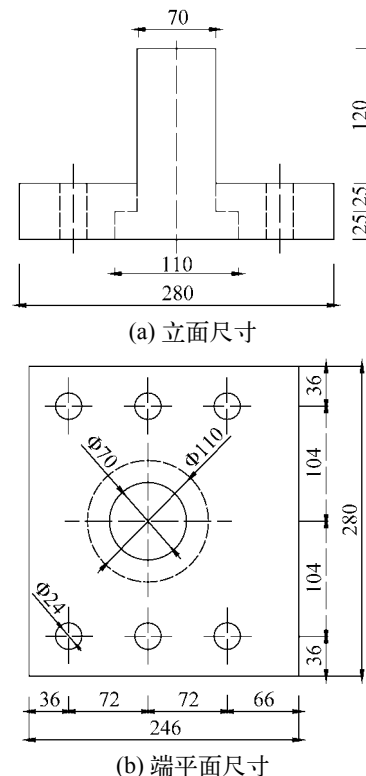


图2 加载板设计图(单位:mm)  
Fig.2 Configuration of loading plate

表 1 试件参数表  
Tab.1 Parameters of specimens

序号	试件编号	养护温度 /℃	钢纤维体积掺量 /%	钢管壁厚 /mm	试件批次	序号	试件编号	养护温度 /℃	钢纤维体积掺量 /%	钢管壁厚 /mm	试件批次
1	ST3V0C3-1	90	0	2.5	文献 [3]	21	ST3V2C1-2	20	2	2.5	文献 [3]
2	ST3V0C3-2	90	0	2.5	文献 [3]	22	ST3V2C1-3	20	2	2.5	文献 [3]
3	ST3V0C3-3	90	0	2.5	文献 [3]	23	ST3V2C2-1	60	2	2.5	文献 [3]
4	ST3V1C3-1	90	1	2.5	文献 [3]	24	ST3V2C2-2	60	2	2.5	文献 [3]
5	ST3V1C3-2	90	1	2.5	文献 [3]	25	ST3V2C2-3	60	2	2.5	文献 [3]
6	ST3V1C3-3	90	1	2.5	文献 [3]	26	ST3V2C4-1	180	2	2.5	文献 [3]
7	ST3V2C3-1	90	2	2.5	文献 [3]	27	ST3V2C4-2	180	2	2.5	文献 [3]
8	ST3V2C3-2	90	2	2.5	文献 [3]	28	ST3V2C4-3	180	2	2.5	文献 [3]
9	ST3V2C3-3	90	2	2.5	文献 [3]	29	ST1V2C3-1	90	2	1.5	文献 [8]
10	ST3V2C3-4	90	2	2.5	文献 [3]	30	ST1V2C3-2	90	2	1.5	文献 [8]
11	ST3V2C3-5	90	2	2.5	文献 [3]	31	ST1V2C3-3	90	2	1.5	文献 [8]
12	ST3V2C3-6	90	2	2.5	文献 [8]	32	ST2V2C3-1	90	2	2	文献 [8]
13	ST3V2C3-7	90	2	2.5	文献 [8]	33	ST2V2C3-2	90	2	2	文献 [8]
14	ST3V2C3-8	90	2	2.5	文献 [8]	34	ST2V2C3-3	90	2	2	文献 [8]
15	ST3V2C3-9	90	2	2.5	文献 [9]	35	ST4V2C3-1	90	2	3	文献 [8]
16	ST3V2C3-10	90	2	2.5	文献 [9]	36	ST4V2C3-2	90	2	3	文献 [8]
17	ST3V3C3-1	90	3	2.5	文献 [3]	37	ST4V2C3-3	90	2	3	文献 [8]
18	ST3V3C3-2	90	3	2.5	文献 [3]	38	ST5V2C3-1	90	2	3.5	文献 [8]
19	ST3V3C3-3	90	3	2.5	文献 [3]	39	ST5V2C3-2	90	2	3.5	文献 [8]
20	ST3V2C1-1	20	2	2.5	文献 [3]	40	ST5V2C3-3	90	2	3.5	文献 [8]

试验试件编号说明如下：

ST3V4C3-1

- 试件编号，同一类型试件按制作顺序编号。
- 养护温度，C1 为 20℃ 标养，C2 为 60℃ 蒸养，C3 为 90℃ 蒸养，C4 为 180℃ 蒸养。
- 钢纤维体积掺量，V0 为 0%，V1 为 1.0%，V2 为 2.0%，V3 为 3.0%。
- 钢管壁厚，T1 为 1.5 mm，T2 为 2.0 mm，T3 为 2.5 mm，T4 为 3.0 mm，T5 为 3.5 mm。

表 2 RPC 材性试验结果

Tab.2 material characteristic test results of RPC

试件编号	试件来源	抗压强度 /MPa	抗压弹模 /MPa	流动度 /mm
V0C3	文献 [3, 8]	108.0	41.3	230.7
V1C3	文献 [3, 8]	116.9	43.7	228.4
V2C3	文献 [3, 8]	127.7	47.0	226.3
V3C3	文献 [3, 8]	134.0	49.9	236.2
V2C1	文献 [3, 8]	119.1	44.0	234.4
V2C2	文献 [3, 8]	123.1	45.4	235.1
V2C4	文献 [3, 8]	131.6	48.7	229.4
V2C3	文献 [9]	129.9	48.3	226.8

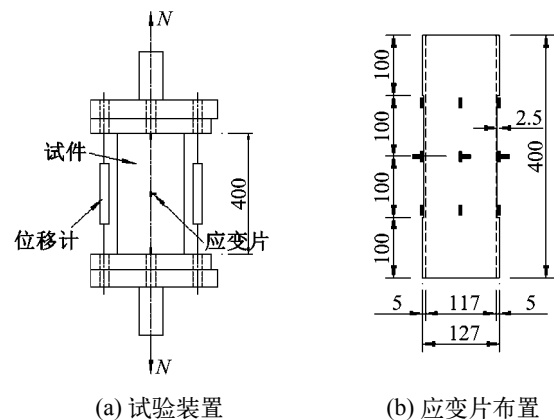


图 3 试验装置和应变片布置 (单位: mm)

Fig.3 Test device and strain gauge layout

## 2.2 应变增长模式

以轴拉力  $N$  为纵坐标，试件中截面处钢管轴向

应变为横坐标，钢管 -RPC 典型的荷载 - 应变曲线见图 5。图中， $K$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  点分别代表初裂点、

比例极限点、屈服点、强化点和峰值点。定义初裂点的应变及其荷载分别为  $\epsilon_{cr}$  和  $F_{cr}$ ，峰值点的应变及其荷载分别为  $\epsilon_{max}$  和  $F_{max}$ 。

在  $OK$  段内，钢管和RPC都处于弹性阶段，超过  $K$  点时，可以明显听到RPC开裂发出的“砰”的声音，故判断  $K$  点为初裂点，此时应变  $\epsilon_{cr}$  为  $190 \mu\epsilon$  左右。 $\epsilon_{cr}$  约为  $0.3\% \epsilon_{max}$ ，而  $F_{cr}$  约为  $F_{max}$  的  $25\%$ 。

在  $KA$  段内，管内RPC裂缝逐渐发展，曲线不再呈线性关系，曲线斜率开始缓慢下降，直至  $A$  点。 $A$  点为钢管的比例极限点，此时应变超过了  $1700 \mu\epsilon$ ，荷载约为  $0.78F_{max}$ 。

在  $AB$  段内，钢管开始产生塑性变化，曲线斜率快速下降，直到  $B$  点。 $B$  点为钢管屈服点，此时应变超过了  $2000 \mu\epsilon$ ，钢材屈服。

在  $BCD$  段内，钢管变形继续增加，伴随着“叮叮”的声音。达到  $D$  点后，中截面处钢管开裂，荷载迅速减小，变形急剧增大，试验结束。 $C$  点为强化点， $D$  点为峰值点。

### 3 承载力定义

#### 3.1 初裂承载力

对于钢管-RPC轴拉试件，管内RPC一旦开裂就会进入多裂缝发展阶段，使得钢管的应变进入非线性增长阶段，本文定义的初裂点是通过延长线性

段，斜率开始下降的点为初裂点。若定义中截面应变达到  $5000 \mu\epsilon$  时的荷载为  $F_{5000}$ ，中截面应变达到  $10000 \mu\epsilon$  时的荷载为  $F_{10000}$ ，则各特征点的应变及其荷载如表3所示。

由表3可知，初裂点荷载  $F_{cr}$  与峰值荷载  $F_{max}$  之比的平均值为  $25.0\%$ ，标准差为  $0.046$ ，以此方法定义钢管-RPC初裂承载力保守可信，离散性小。

#### 3.2 极限承载力

虽然钢管-RPC轴拉极限应变超过了  $50000 \mu\epsilon$ ，较普通钢管混凝土具有更好的延性，但两者的破坏机理和破坏模式基本类似，文献[17]定义中截面应变达到  $5000 \mu\epsilon$  时的荷载为钢管混凝土轴拉极限承载力。根据表3可知，钢管-RPC轴拉试件  $F_{5000}/F_{max}$  的平均值为  $76.5\%$ ，标准差为  $0.071$ ，此时钢管已进入塑性，若以此来定义钢管-RPC轴拉承载力不会过低，同时也相对安全。 $F_{10000}/F_{max}$  的平均值为  $80.8\%$ ，标准差为  $0.064$ 。 $F_{10000}$  相较于  $F_{5000}$  仅提高了  $4.3\%$ ，提高幅度不明显，但中截面处应变却增加了1倍。考虑到应变过大会对结构的安全性造成不利的影响，同时借鉴钢管混凝土轴拉承载力的定义方式，本文建议以荷载  $F_{5000}$  为钢管-RPC轴拉极限承载力，该方法保守可行，且置信度高。

### 4 结论

1) 钢管-RPC轴拉试验的传力装置与试件加工制作精密，满足试验设计要求，同时RPC和钢管的物理力学性能均满足试验要求。试验加载测试顺利，数据稳定可靠，试验获得了预期的失效模式，试验成功率达到  $95\%$ 。

2) 钢管-RPC轴拉试件的典型破坏模式为中截面受拉破坏。在荷载作用下，首先是水泥基体被拉裂并伴随发出“砰”的声音，接着钢纤维被拔出并发出“叮叮”的响声，最后钢管开裂，试件失去承载力。钢管-RPC具有很好的组合效应，在受力过程中RPC能够与钢管协同受力，钢纤维在RPC开裂后起到重要的桥接作用。

3) 钢管-RPC轴拉试件的荷载-应变曲线可分为弹性段、弹塑性段和强化段，应变增长模式与钢管混凝土类似。

4) 以截面平均应变达到  $5000 \mu\epsilon$  时的荷载为钢管-RPC轴拉极限承载力，既具有足够的安全度，又与钢管混凝土轴拉承载力的定义方法一致，方法

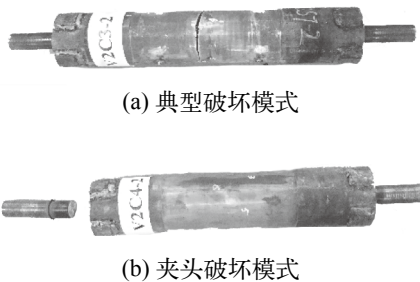


图4 试件破坏模式

Fig.4 Failure modes of specimens

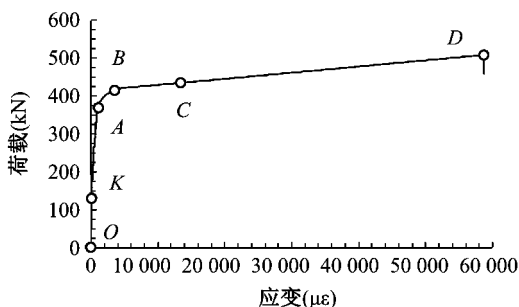


图5 钢管-RPC荷载-应变全过程曲线

Fig.5 Measured  $N-\epsilon$  whole curve of RPC-FST

表 3 特征点荷载对比  
Tab.3 Comparison of characteristic point load

试件编号	$F_{cr}$ /kN	$\varepsilon_{cr}$ / $\mu\varepsilon$	$F_{5000}$ /kN	$F_{10000}$ /kN	$F_{max}$ /kN	$\varepsilon_{max}$ / $\mu\varepsilon$	$\frac{F_{cr}}{F_{max}}$ /%	$\frac{F_{5000}}{F_{max}}$ /%	$\frac{F_{10000}}{F_{max}}$ /%	$\frac{F_{10000} - F_{5000}}{F_{max}}$ /%
ST3V0C3-1	75	136	311	332	420	45 621	17.9	74.0	79.0	5.0
ST3V0C3-2	91	160	302	325	473	60 549	19.2	63.8	68.7	4.9
ST3V0C3-3	73	127	317	335	481	54 588	15.2	65.9	69.6	3.7
ST3V1C3-1	110	188	357	377	469	57 740	23.5	76.1	80.4	4.3
ST3V1C3-2	100	168	370	383	482	63 014	20.7	76.8	79.5	2.7
ST3V1C3-3	86	145	373	387	491	61 023	17.5	76.0	78.8	2.9
ST3V2C3-1	160	257	384	407	482	58 641	33.2	79.7	84.4	4.8
ST3V2C3-2	121	190	391	414	489	56 774	24.7	80.0	84.7	4.7
ST3V2C3-3	112	176	378	400	464	60 233	24.1	81.5	86.2	4.7
ST3V2C3-4	125	198	387	407	482	55 160	25.9	80.3	84.4	4.1
ST3V2C3-5	132	208	387	405	488	59 642	27.0	79.3	83.0	3.7
ST3V2C3-6	134	202	400	437	554	65 366	24.2	72.2	78.9	6.7
ST3V2C3-7	125	187	398	433	547	60 227	22.9	72.8	79.2	6.4
ST3V2C3-8	132	198	402	438	544	64 336	24.3	73.9	80.5	6.6
ST3V2C3-9	119	192	404	411	519	58 784	22.9	77.8	79.2	1.3
ST3V2C3-10	130	198	438	445	508	55 762	25.6	86.2	87.6	1.4
ST3V3C3-1	139	207	406	421	449	54 521	31.0	90.4	93.8	3.3
ST3V3C3-2	146	223	409	432	485	54 973	30.1	84.3	89.1	4.7
ST3V3C3-3	167	260	412	422	437	48 810	38.2	94.3	96.6	2.3
ST3V2C1-1	94	157	365	386	486	54 772	19.3	75.1	79.4	4.3
ST3V2C1-2	104	174	355	375	493	62 014	21.1	72.0	76.1	4.1
ST3V2C1-3	114	186	363	384	475	55 379	24.0	76.4	80.8	4.4
ST3V2C2-1	112	182	379	388	486	67 164	23.0	78.0	79.8	1.9
ST3V2C2-2	99	161	384	402	472	63 740	21.0	81.4	85.2	3.8
ST3V2C2-3	146	237	378	392	466	59 741	31.3	81.1	84.1	3.0
ST3V2C4-1	138	212	395	411	501	66 314	27.5	78.8	82.0	3.2
ST3V2C4-2	139	207	405	425	446	50 231	31.2	90.8	95.3	4.5
ST3V2C4-3	162	249	393	409	490	61 445	33.1	80.2	83.5	3.3
ST1V2C3-1	88	155	253	266	321	49 759	27.4	78.8	82.9	4.0
ST1V2C3-2	92	153	257	270	324	49 321	28.4	79.3	83.3	4.0
ST1V2C3-3	84	151	252	265	330	51 282	25.5	76.4	80.3	3.9
ST2V2C3-1	102	168	332	340	440	61 669	23.2	75.5	77.3	1.8
ST2V2C3-2	99	165	341	351	441	59 165	22.4	77.3	79.6	2.3
ST2V2C3-3	106	168	329	339	439	58 701	24.1	74.9	77.2	2.3
ST4V2C3-1	157	228	436	489	639	71 396	24.6	68.2	76.5	8.3
ST4V2C3-2	143	214	447	495	637	71 234	22.4	70.2	77.7	7.5
ST4V2C3-3	160	236	452	502	627	73 207	25.5	72.1	80.1	8.0
ST5V2C3-1	188	257	474	519	763	78 360	24.6	62.1	68.0	5.9
ST5V2C3-2	181	247	458	508	737	80 491	24.6	62.1	68.9	6.8
ST5V2C3-3	194	268	469	517	721	84 590	26.9	65.0	71.7	6.7
						平均值	25.0	76.5	80.8	4.3
						标准差	4.6	7.1	6.4	1.8

合理可行,可以为工程设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 陈宝春, 季 韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
- [2] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149.
- [3] 应 铮. 钢管活性粉末混凝土直接轴拉性能试验研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [4] 陈宝春, 牟廷敏, 陈宜言, 等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(Z1): 1-10.
- [5] 吴庆雄, 黄育凡, 陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁非线性地震响应分析 [J]. 工程力学, 2015, 32(12): 90-98.
- [6] ZHOU Xiaojun, MOU Tingming, FAN B K, et al. Mechanical properties and volume deformation of steel fiber reinforced micro-expansive concrete filled steel tube[J]. Applied mechanics & materials, 2012, 204-208: 4083-4087.
- [7] 李 靖. 钢管壁厚对钢管 RPC 轴拉性能影响的试验研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [8] 姚鹏宇. 钢管-RPC 偏拉性能试验研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [9] HUANG Wenjin, LAI Zhichao, CHEN Baochun, et al. Concrete-filled steel tube (CFT) truss girders: Experimental tests, analysis, and Design[J]. Engineering Structures, 2018, 156: 118-129.
- [10] HUANG Wenjin, FENU Luigi, CHEN Baochun, et al. Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 141: 241-250.
- [11] HUANG Wenjin, LAI Zhichao, CHEN Baochun, et al. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders[J]. Engineering Structures, 2017, 152: 607-618.
- [12] 谢志涛, 孙 涵, 黄文金. 细长钢管混凝土构件混凝土应变测试 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(1): 13-16.
- [13] 田志敏, 张想柏, 冯建文, 等. 钢管超高性能 RPC 短柱的轴压特性研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2008 (1): 99-107.
- [14] LUO Hua, YAN Zhigang, AN Mingzhe. Finite element analysis of RPC-filled steel tube stub columns[J]. Advanced material research, 2011, 189-193: 1906-1909.
- [15] 邹慧辉, 陈万祥, 姜 猛. 钢管 RPC 柱的力学性能及极限分析研究现状 [J]. 混凝土, 2016(2): 29-33.
- [16] 黄文金, 盛 叶, 张正宾, 等. 钢管-钢纤维活性粉末混凝土界面黏结强度试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 48(Z1): 502-507.
- [17] HAN Linhai, HE Shanhu, LIAO Feiyu. Performance and calculations of concrete filled steel tubes (CFST) under axial tension[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(11): 1699-1709.
- [18] LI Wei, HAN Linhai, CHAN TakMing. Tensile behaviour of concrete-filled double-skin steel tubular members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 99: 35-46.
- [19] HUANG Wenjin, ZHANG Zhengbin, HUANG Qingwei, et al. Experimental study on mechanical properties of RPC-FST under direct tension load[C]// Proceedings of 1st International Conference on UHPC Materials and Structures: Changsha, China, 2016: 236-246.

(责任编辑 王利君)

(上接第 24 页) uage reference manual [S].

- [13] 唐春风, 刁 波, 王利锋. IFC 文件的一般结构和 EXPRESS 语言介绍 [C]// 全国工程建设计算机应用学术会议. 2004: 450-455.
- [14] buildingSMART. Industry Foundation Classes Version 4 - Addendum 2[EB/OL]. (2016-07-15)[2017-09-03]. [http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/annex/annex-d/ifckernel/diagram\\_0001.htm](http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/annex/annex-d/ifckernel/diagram_0001.htm).

annex/annex-d/ifckernel/diagram\_0001.htm.

- [15] 李荣冰, 刘建业, 曾庆化, 等. 基于 MEMS 技术的微型惯性导航系统的发展现状 [J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(6): 88-94.
- [16] 周洪波, 施平望, 邓雪原. 基于 IFC 标准的 BIM 构件库研究 [J]. 图学学报, 2017(4): 589-595.

(责任编辑 王利君)