

不锈钢管再生混凝土弯曲性能

杨有福*, 马国梁

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 进行 12 个不锈钢管再生混凝土试件和 2 个不锈钢管普通混凝土对比试件的试验研究, 考察截面类型和再生骨料取代率对弯曲荷载作用下不锈钢管再生混凝土破坏形态、荷载-变形关系和受弯承载力的影响。结果表明, 不锈钢管再生混凝土的弯曲性能与相应不锈钢管普通混凝土类似, 但随着再生骨料取代率的增大, 不锈钢管再生混凝土的受弯承载力有降低的趋势。在确定不锈钢和核心再生混凝土本构关系的基础上, 利用基于有限元软件 ABAQUS 建立的理论模型对不锈钢管再生混凝土的弯曲性能进行了模拟, 总体上模拟结果与试验结果吻合良好。

关键词: 不锈钢管再生混凝土; 再生骨料; 弯曲性能; 受弯承载力; 有限元分析
中图分类号: TU398 **文献标志码:** A

0 引言

不锈钢具有耐久性好、抗腐蚀性强、塑性和韧性好、防火性能好、外表美观及维护费用低等优点, 可作为高性能钢材用于对耐久性要求高的工程结构中^[1]。但由于不锈钢造价昂贵, 无法在结构中广泛使用。将混凝土灌入不锈钢管形成不锈钢管混凝土, 可大幅减小不锈钢管壁厚, 从而达到减少不锈钢用量、降低成本的目的, 同时混凝土的存在也有利于提高薄壁不锈钢管的稳定性, 这些使不锈钢在工程结构中广泛应用成为可能^[2-3]。近期, 不锈钢管混凝土已用于香港昂船洲大桥的桥塔和纽约赫斯特大厦的框架结构^[2], 取得了良好的建筑效果和经济效益, 并显著提高了结构的耐久性。近年来不锈钢管混凝土已得到了一定的研究, Uy 等^[4]总结了以往完成的有关不锈钢管混凝土的研究, 并报道了其最新完成的不锈钢管混凝土短柱和长柱的试验结果。此外, Dai 等^[5]和 Lam 等^[6]报道了椭圆形不锈钢管混凝土短柱的试验和理论研究结果, 并建议了该类组合柱轴压承载力的简化计算公式。Tao 等^[3]对方形不锈钢管混凝土短柱进行了有限元模拟。Feng 等^[7-8]试验研究了 T 型和 X 型弦杆为不锈钢管混凝土管节点的力学性能。

与此同时, 日益严重的废弃混凝土处理问题

以及天然骨料逐渐稀缺的问题, 促使再生混凝土的研究和应用成为全球热点^[9]。与普通混凝土相比, 再生混凝土具有抗压强度和弹性模量低、工作性能和抗冻融性能差、收缩和徐变较大等缺点^[9]。因此, 当再生混凝土用于工程结构时, 应设法减小其上述缺点的不利影响。将再生混凝土灌入空钢管形成钢管再生混凝土, 使再生混凝土处于外钢管的约束和保护之下, 能改善再生混凝土的性能并促进再生混凝土在结构工程中的推广和应用。本课题组已对碳素钢管再生混凝土构件在一次加载下的静力性能、长期荷载作用下的力学性能, 以及往复荷载作用下的滞回性能进行了试验研究^[10-12], 结果表明碳素钢管再生混凝土的力学性能与碳素钢管普通混凝土类似, 将其用于工程结构是可行的。

目前, 对不锈钢管混凝土和钢管再生混凝土的研究较多, 但对不锈钢管再生混凝土的研究尚少见报道。不锈钢管再生混凝土有望综合不锈钢和钢管混凝土耐久性好、承载力高、塑性和韧性好等特点, 其应用也可促进废弃混凝土资源化的进程。本文首先试验研究不锈钢管再生混凝土的弯曲性能, 然后分析再生骨料取代率对不锈钢管再生混凝土弯曲性能的影响, 最后在确定不锈钢和核心再生混凝土本构关系的基础上对不锈钢管再

生混凝土的弯曲性能进行理论模拟。

1 试验研究

1.1 试件制作

进行了 14 个试件的试验研究,主要参数:截面形状,圆形和方形;再生骨料取代率(r),0(普通混凝土)~75%, r 定义为再生粗(细)骨料占全部粗(细)骨料的质量百分比.试件设计情况见表 1,其中, D 为试件截面外直径(圆形)或外边长(方形), t 为实测不锈钢管壁厚, M_{uc} 为实测受弯承载力, M_{uc} 为有限元计算受弯承载力.所有试件的实际长度为 1 200 mm(计算跨度 1 000 mm).试件编号中,第一个字母 C 和 S 分别代表圆形和方形截面,短线以后部分代表核心混凝土类型.

试件制作时,先按截面形状、尺寸和长度加工空不锈钢管,再按钢管截面形状为每个试件加工 2 个厚度为 12 mm 的碳素钢盖板.先将空不锈钢管的一端焊上盖板,另一盖板待浇灌完混凝土且养护 14 d 后再焊接,并保证焊接时盖板和不锈钢管的几何对中.

表 1 试件一览表

Tab.1 Summary of specimens

序号	编号	$(D\times t)/$ (mm×mm)	$M_{uc}/$ (kN·m)	$M_{uc}/$ (kN·m)	M_{uc}/M_{uc}
1	C-NC	120×1.77	11.72	11.98	1.022
2	C-RCC1	120×1.77	11.57	11.87	1.026
3	C-RCC2	120×1.77	11.56	11.98	1.036
4	C-RCC3	120×1.77	11.54	11.70	1.014
5	C-RCF1	120×1.77	11.51	11.79	1.024
6	C-RCF2	120×1.77	10.63	11.68	1.099
7	C-RCF3	120×1.77	10.60	11.62	1.096
8	S-NC	120×1.77	15.23	15.76	1.035
9	S-RCC1	120×1.77	14.65	15.52	1.059
10	S-RCC2	120×1.77	14.31	15.40	1.076
11	S-RCC3	120×1.77	14.36	15.35	1.069
12	S-RCF1	120×1.77	14.55	15.45	1.062
13	S-RCF2	120×1.77	14.25	15.30	1.074
14	S-RCF3	120×1.77	13.63	15.25	1.119

1.2 材料性能

钢管由 06Cr19Ni10(AISI 304)不锈钢板加工而成,不锈钢的力学性能由标准拉伸试验确定,3 个拉伸试件取自不锈钢板的任意位置.实测不锈钢的应力-应变曲线如图 1 所示.可见,不锈钢的应力-应变曲线与碳素钢有明显不同:比例极限很低,没有明显的屈服平台,后期应变强化现象显著,抗拉强度和断后伸长率都远大于碳素钢.实测不锈钢的名义屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (残余应变为 0.2%时

的应力)、抗拉强度 σ_u 、初始弹性模量 E_0 、泊松比 μ 和伸长率 δ 分别为 286.7 MPa、789.6 MPa、 1.85×10^5 MPa、0.276 和 72.7%.

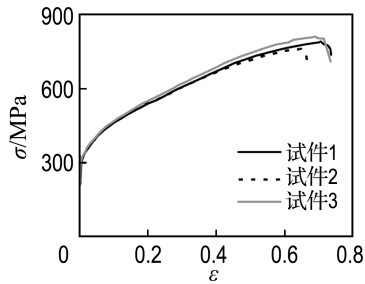


图 1 不锈钢应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of stainless steel

制备了 7 种混凝土,包括采用天然骨料的普通混凝土(NC),再生粗骨料取代率为 25%、50% 和 75%的再生混凝土(编号分别为 RCC1、RCC2 和 RCC3)和再生细骨料取代率为 25%、50% 和 75%的再生混凝土(编号分别为 RCF1、RCF2 和 RCF3).混凝土的配合比如表 2 所示.

表 2 混凝土的配合比

Tab.2 The mix proportions of concrete

编号	r/%	配比/(kg·m ⁻³)						
		水泥	细骨料		粗骨料		减水剂	水
			天然	再生	天然	再生		
NC	0	473	636	0	1 072	0	2.84	213.3
RCC1	25	473	636	0	804	268	2.84	213.3
RCC2	50	473	636	0	536	536	2.84	213.3
RCC3	75	473	636	0	268	804	2.84	213.3
RCF1	25	473	477	159	1 072	0	2.84	213.3
RCF2	50	473	318	318	1 072	0	2.84	213.3
RCF3	75	473	159	477	1 072	0	2.84	213.3

再生粗、细骨料经颚式破碎机破碎废弃混凝土获得,再生细骨料的粒径为 0.5~5.0 mm,再生粗骨料的粒径为 5~20 mm.其他材料包括 42.5 级普通硅酸盐水泥,粒径为 5~25 mm 的天然石灰岩碎石,天然黄砂(中砂),西卡牌减水剂和自来水.再生粗骨料和天然碎石的吸水率分别为 8.49% 和 0.78%,压碎指标分别为 29.4% 和 11.5%,表观密度分别为 2 650 kg/m³ 和 2 730 kg/m³,堆积密度分别为 1 200 kg/m³ 和 1 470 kg/m³;再生细骨料和天然砂的吸水率分别为 8.3% 和 1.6%,细度模数分别为 3.0 和 2.7,表观密度分别为 2 440 kg/m³ 和 2 680 kg/m³,堆积密度分别为 1 150 kg/m³ 和 1 400 kg/m³.

混凝土的抗压强度(f_{cu})和弹性模量(E_c)分

别由边长 150 mm 的立方体和 150 mm×150 mm×300 mm 的棱柱体轴压试验获得. 表 3 所示为混凝土的性能, 其中 $f_{cu,28}$ 和 $f_{cu,t}$ 分别为混凝土 28 d 和试验时的抗压强度. 可见, 再生混凝土的 f_{cu} 和 E_c 均低于普通混凝土, 且 f_{cu} 和 E_c 随再生骨料取代率的增大而减小, 同时相同骨料取代率情况下含再生细骨料的再生混凝土的 f_{cu} 和 E_c 均低于含再生粗骨料的再生混凝土. 这些与以往的研究结果类似^[9]. 此外, 再生混凝土的坍落度也都低于普通混凝土, 且再生骨料取代率越大, 再生混凝土的坍落度越小, 这主要是再生骨料具有更粗糙的外表面造成的.

表 3 混凝土的性能
Tab. 3 The properties of concrete

编号	$r/\%$	$f_{cu,28}/$ MPa	$f_{cu,t}/$ MPa	$E_c/$ 10^4 MPa	坍落度/ mm
NC	0	55.7	63.4	3.76	170
RCC1	25	53.0	59.7	3.53	110
RCC2	50	51.1	57.3	3.36	80
RCC3	75	50.4	56.9	3.05	30
RCF1	25	52.0	58.6	3.27	165
RCF2	50	49.2	56.2	3.03	145
RCF3	75	48.5	55.3	2.78	120

1.3 试验方法

试验采用四分点加载方式, 试验装置如图 2 所示. 为了准确测量试件的变形, 在每个试件跨中截面外管间隔 90° 的四点布置应变片, 每点纵、横向应变片各 1 个; 同时在试件的 3 个四分点和两个支座处各布置 1 个位移计以测量试件的竖向变形.

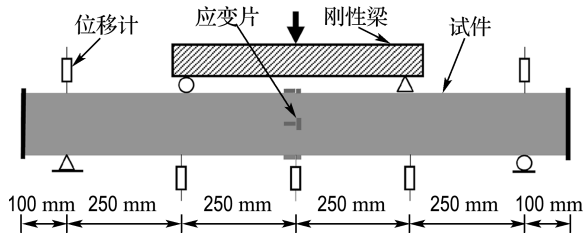


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic view of the test setup

试验采用分级加载制度, 达到预计受弯承载力的 60% 以前每级荷载约为预计极限荷载的 1/10, 之后每级荷载约为预计极限荷载的 1/15, 直至试件跨中挠度达到计算跨度的 1/10 左右以后结束试验.

1.4 试验结果

图 3 所示为全部试件的破坏形态.

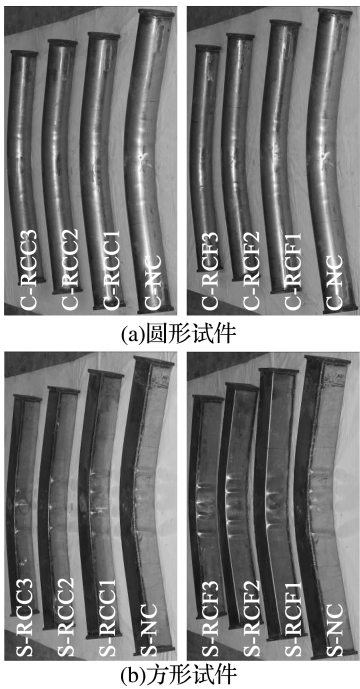


图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure pattern of the tested specimens

由图 3 可以看出, 不锈钢管再生混凝土试件的破坏形态与相应不锈钢管普通混凝土试件类似. 试验结束后, 圆形试件受压区钢管的局部鼓曲并不明显, 而方形试件受压区钢管则出现明显的局部鼓曲, 3~5 个鼓曲波几乎对称地分布于试件的纯弯段. 与碳素钢管混凝土类似^[13], 这主要是由圆形不锈钢管对混凝土的约束好于方形不锈钢管所致.

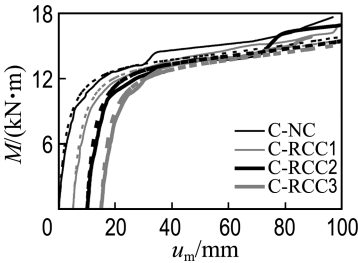
典型试件核心混凝土的破坏形态如图 4 所示. 可见, 圆形试件纯弯段压区混凝土基本没有出现压碎现象, 而方形试件纯弯段压区钢管鼓曲部位的混凝土有明显压碎现象. 圆形和方形试件纯弯段拉区混凝土均出现若干横向裂缝, 总体上裂缝呈均匀分布趋势并延伸至截面 3/4 高度处, 而试件的弯剪段混凝土没有出现任何斜裂缝, 这与钢筋混凝土受弯构件不同. 此外, 由于两端盖板的存在, 不锈钢管与核心混凝土之间的相对滑移并不明显.

实测试件的弯矩 (M)-跨中挠度 (u_m) 和弯矩 (M)-跨中截面应变 (ϵ) 曲线分别如图 5 和 6 中实线所示, 限于篇幅图 6 仅给出了最大纵向拉、压应变的变化情况. 为了表达清楚, 再生骨料取代率为 25%、50% 和 75% 试件的 $M-u_m$ 曲线的横坐标分别右移 5、10 和 15 mm; $M-\epsilon$ 曲线的横坐标分别左、右移 0.001、0.002 和 0.003. 可见, 不锈钢管再生混凝土具有良好的抗弯性能, 全部试件都表现出良好的延性和后期承载能力.

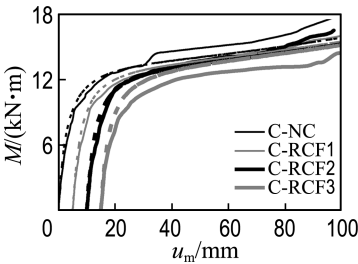


图 4 核心混凝土破坏形态

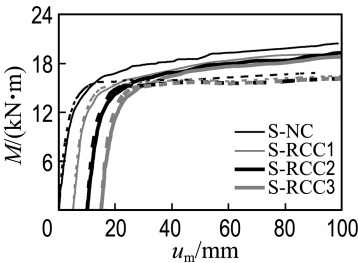
Fig. 4 Failure pattern of core concrete



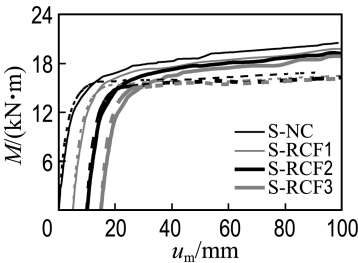
(a) 圆形试件,再生粗骨料



(b) 圆形试件,再生细骨料



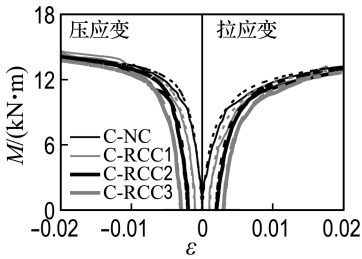
(c) 方形试件,再生粗骨料



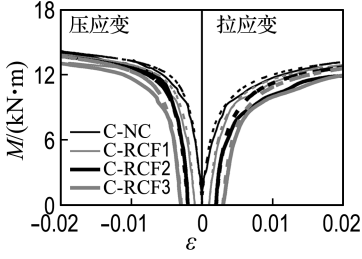
(d) 方形试件,再生细骨料

图 5 弯矩-跨中挠度曲线

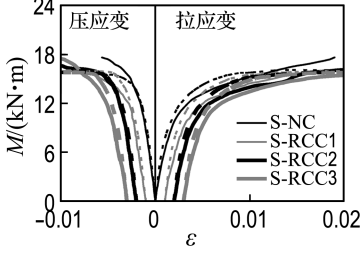
Fig. 5 Moment versus mid-span deflection curves



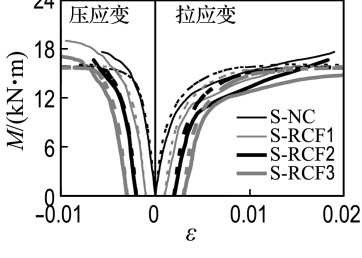
(a) 圆形试件,再生粗骨料



(b) 圆形试件,再生细骨料



(c) 方形试件,再生粗骨料



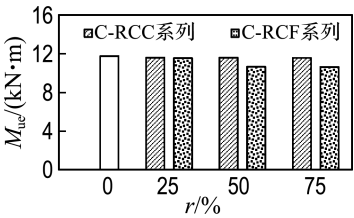
(d) 方形试件,再生细骨料

图 6 弯矩-应变曲线

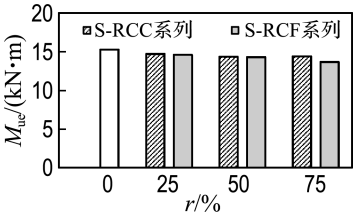
Fig. 6 Moment versus strain curves

上述不锈钢管再生混凝土纯弯构件试验结果表明,其受力状态和抵抗变形的能力与碳素钢管混凝土和碳素钢管再生混凝土受弯构件类似^[10,13],定义不锈钢管再生混凝土纯弯构件的外钢管最大拉应变达到 0.01 时的弯矩为其受弯承载力.试件实测受弯承载力(M_{ue})列于表 1 中,图 7 所示为截面形状和再生骨料取代率对 M_{ue} 的影响.可见,圆形和方形不锈钢管再生混凝土试件的 M_{ue} 均低于相应不锈钢管普通混凝土试件的,且随着再生骨料取代率的增大而降低,但总体降低幅度不大.此外,在再生骨料取代率相同的情况

下,含再生粗骨料试件具有较高的受弯承载力.这主要是因为本试验中再生混凝土的强度随再生骨料取代率的增大而减小,且含再生粗骨料的再生混凝土具有较高的抗压强度.



(a) 圆形试件



(b) 方形试件

图 7 截面类型和再生骨料取代率对受弯承载力的影响

Fig. 7 Effect of sectional type and recycled aggregate replacement ratio on M_u

2 有限元模拟

采用大型通用有限元软件 ABAQUS^[14]建立不锈钢管再生混凝土纯弯构件的理论模型,并利用试验结果验证其准确性.

2.1 不锈钢模型

不锈钢的应力(σ)-应变(ϵ)关系具有很强的非线性特征,常用的 $\sigma\epsilon$ 模型为 Ramberg-Osgood 模型^[1],如下式所示:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \tag{1}$$

式中: E_0 为初始弹性模量; $\sigma_{0.2}$ 为名义屈服强度; $n[\ln 20/\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})]$ 为应变硬化指数, $\sigma_{0.01}$ 为残余应变为 0.01% 时的应力.

Rasmussen^[15]、Gardner 等^[16]和 Quach 等^[17]的研究表明:式(1)在不锈钢的应力小于 $\sigma_{0.2}$ 时的精度很好,但当应变较大时计算得到的应力过大.因此, Rasmussen^[15]、Gardner 等^[16]和 Quach 等^[17]分别在式(1)的基础上,提出了不锈钢在其应力大于 $\sigma_{0.2}$ 后的 $\sigma\epsilon$ 关系.欧洲规范^[18]建议的不锈钢在其应力大于 $\sigma_{0.2}$ 后的 $\sigma\epsilon$ 关系如下式所示:

$$\epsilon = 0.002 + \frac{\sigma_{0.2}}{E_0} + \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \epsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m \tag{2}$$

式中: $E_{0.2} = E_0/[1 + 0.002n(E_0/\sigma_{0.2})]$; $\epsilon_u = 1 - \sigma_{0.2}/\sigma_u$; $m = 1 + 3.5(\sigma_{0.2}/\sigma_u)$;欧洲规范^[18]还规定式(1)和(2)中的应变硬化指数 n 和抗拉强度 σ_u 可根据实际情况取设计值或实测值.

图 8 所示为上述 5 种模型计算的不锈钢 $\sigma\epsilon$ 曲线与本文试验结果(试件 1)的比较.可见,5 种模型计算的应力小于 $\sigma_{0.2}$ 时的 $\sigma\epsilon$ 曲线总体上与试验结果吻合较好,但当应力超过 $\sigma_{0.2}$ 后仅有欧洲规范模型的计算结果与试验结果较为吻合.本文采用欧洲规范模型[式(1)和式(2)]确定不锈钢的单轴 $\sigma\epsilon$ 关系,其中 E_0 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.01}$ 和 σ_u 采用本文不锈钢拉伸试验的实测均值.

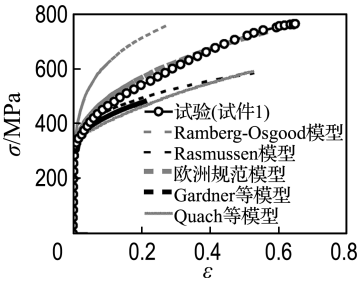


图 8 不锈钢应力-应变关系模型比较

Fig. 8 Comparison of stress versus strain models for stainless steel

不锈钢是一种各向异性材料,但不锈钢板受压数值分析结果表明,不锈钢各向异性性能不显著,在不锈钢的理论模拟中可不考虑其影响^[19].此外,冷加工制成的薄壁不锈钢管弯角区域的强度有很大提高,且存在由冷弯和焊接加工产生的残余应力、局部几何缺陷和整体几何缺陷.方形不锈钢管混凝土轴压短柱非线性分析结果表明^[3],这些因素对薄壁不锈钢管混凝土构件的承载力和变形影响很小,故本文有限元模型暂不考虑上述因素,不锈钢采用各向同性金属弹塑性模型并满足 von Mises 屈服准则.

2.2 混凝土模型

核心再生混凝土采用 ABAQUS 软件中的混凝土损伤塑性模型,其受压时的等效单轴应力(σ)-应变(ϵ)关系暂采用侯睿^[20]提出的考虑再生骨料取代率对峰值应力和峰值应变影响的模型.再生混凝土受拉性能采用 ABAQUS 软件中提供的基于能量准则的受拉软化模型,当混凝土强度为 20 MPa 时断裂能(G_f)为 40 N/m;当混凝土强度为 40 MPa 时 $G_f=120$ N/m.再生混凝土开裂应力取 1/10 单轴峰值压应力.

2.3 界面模型

与碳素钢管混凝土类似^[13]，不锈钢管与核心再生混凝土的界面模型由法向的“硬接触”和切向的黏结滑移组成。在法向，不锈钢管和核心再生混凝土之间可以完全传递压应力，当压应力为零或负值时允许界面分离；在切向，不锈钢管和核心再生混凝土之间采用库仑摩擦模型，二者之间的摩擦因数取为 0.25^[3]。

2.4 单元类型、网格划分和边界条件

不锈钢管采用四节点减缩积分的壳单元(S4)，核心再生混凝土采用八节点减缩积分的三维实体单元(C3D8R)。根据试件几何形状和边界条件，取实际试件的 1/4 模型进行计算。在数值计算前进行网格试验，以确定满足精度要求和计算时间的网格密度。荷载采用位移加载方式施加于试件加载点的钢管上部。有限元模型的边界条件如图 9 所示。

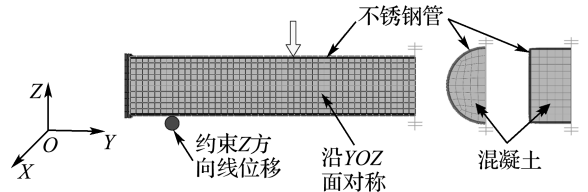


图 9 边界条件
Fig. 9 Boundary conditions

2.5 模拟结果

图 10 所示为有限元模拟典型不锈钢管再生混凝土纯弯构件破坏形态与试验结果的比较。可见，模拟得到的整体弯曲形态和压区钢管的鼓曲位置、鼓曲形态与试验结果基本一致。

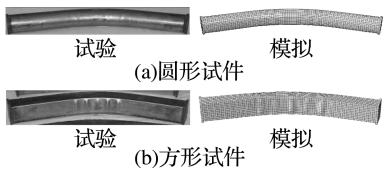


图 10 典型破坏形态比较
Fig. 10 Comparison of typical failure pattern

有限元计算的 $M-u_m$ 和 $M-\epsilon$ 曲线(虚线)与试验结果(实线)的比较分别如图 5 和图 6 所示。可见，总体上计算曲线与试验曲线吻合较好，但计算曲线略高于试验曲线。

图 11 所示为不锈钢管再生混凝土试件受弯承载力计算结果(M_{uc})与试验结果(M_{ue})比值随再生骨料取代率的变化情况。可见，总体上计算结果略高于试验结果， M_{uc}/M_{ue} 的平均值为 1.058，

标准差为 0.033。

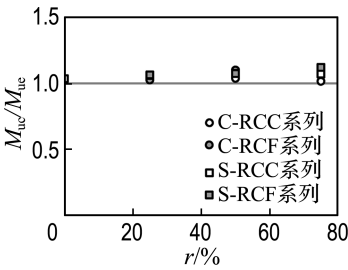


图 11 计算结果与试验结果比较
Fig. 11 Comparison between calculated and measured results

此外，由图 11 还可以看出，与采用再生粗骨料混凝土的试件相比，采用再生细骨料混凝土试件的 M_{uc}/M_{ue} 更高。这可能是由于文献[20]中的模型过高预测了核心再生细骨料混凝土及其与不锈钢管之间相互作用对构件受弯承载力的贡献，导致计算结果比试验结果偏高较多。

3 结 论

(1)弯曲荷载下不锈钢管再生混凝土试件的破坏模式和荷载-变形关系与相应不锈钢管普通混凝土试件类似，表现出良好的延性和后期承载力。

(2)随着再生骨料取代率的增大，不锈钢管再生混凝土试件的受弯承载力有降低的趋势，但降低幅度不大，主要是因为核心再生混凝土的抗压强度随再生骨料取代率的增大而减小。

(3)在合理确定不锈钢和核心再生混凝土本构模型的基础上，对不锈钢管再生混凝土的弯曲性能进行了有限元模拟，计算结果和试验结果总体吻合较好。

参考文献：

[1] Gardner L. The use of stainless steel in structures [J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2005, 7(2):45-55.
[2] Uy B. Stability and ductility of high performance steel sections with concrete infill [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(7-8):748-754.
[3] Tao Z, Uy B, Liao F Y, et al. Nonlinear analysis of concrete-filled square stainless steel stub columns under axial compression [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(11):1719-1732.
[4] Uy B, Tao Z, HAN Lin-hai. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular

- columns [J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2011, **67**(3):360-378.
- [5] Dai X, Lam D. Axial compressive behaviour of stub concrete-filled columns with elliptical stainless steel hollow sections [J]. **Steel and Composite Structures**, 2010, **10**(6):517-539.
- [6] Lam D, Gardner L, Burdett M. Behaviour of axially loaded concrete filled stainless steel elliptical stub columns [J]. **Advances in Structural Engineering**, 2010, **13**(3):493-500.
- [7] Feng R, Young B. Tests of concrete-filled stainless steel tubular T-joints [J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2008, **64**(11):1283-1293.
- [8] Feng R, Young B. Behaviour of concrete-filled stainless steel tubular X-joints subjected to compression [J]. **Thin-Walled Structures**, 2009, **47**(4):365-374.
- [9] Hansen T C. Recycling of demolished concrete and masonry [R] // **Report of RILEM TC 37-DRC on Demolition and Reuse of Concrete**. E&FN Spon; RILEM, 1992.
- [10] YANG You-fu, HAN Lin-hai. Compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubes (RACFST) under short-term loadings [J]. **Steel and Composite Structures**, 2006, **6**(3):257-284.
- [11] YANG You-fu, HAN Lin-hai, WU Xin. Concrete shrinkage and creep in recycled aggregate concrete-filled steel tubes [J]. **Advances in Structural Engineering**, 2008, **11**(4):383-396.
- [12] YANG You-fu, HAN Lin-hai, ZHU Lin-tao. Experimental performance of recycled aggregate concrete-filled circular steel tubular columns subjected to cyclic flexural loadings [J]. **Advances in Structural Engineering**, 2009, **12**(2):183-194.
- [13] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- HAN Lin-hai. **Concrete-filled Steel Tubular Structures-Theory and Practice** [M]. Beijing: China Science Press, 2007. (in Chinese)
- [14] ABAQUS. **ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.7** [M]. Providence: Dassault Systèmes Corp., 2007.
- [15] Rasmussen K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys [J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2003, **59**(1):47-61.
- [16] Gardner L, Ashraf M. Structural design for non-linear metallic materials [J]. **Engineering Structures**, 2006, **28**(6):926-934.
- [17] Quach W M, Teng J G, Chung K F. Three-stage full-range stress-strain model for stainless steels [J]. **Journal of Structural Engineering, ASCE**, 2008, **134**(9):1518-1527.
- [18] EC3. EN 1993-1-4 Design of Steel Structures-Part 1-4: General Rules-Supplementary Rules for Stainless Steels [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [19] Rasmussen K J R, Burns T, Bezkorovainy P, *et al.* Numerical modelling of stainless steel plates in compression [J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2003, **59**(11):1345-1362.
- [20] 侯 睿. 恒高温后钢管再生混凝土轴压力学性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- HOU Rui. Study on compressive behavior of recycled aggregate concrete-filled steel tubes after exposed to high temperatures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)

Flexural performance of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube

YANG You-fu*, MA Guo-liang

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To investigate the effects of sectional type and recycled aggregate replacement ratio on the failure pattern, load versus deformation relationship and bending moment capacity of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube (RACFSST) under bending load, the tests on twelve RACFSST specimens and two concrete filled stainless steel tube (CFSST) specimens are carried out. The experimental results show that the flexural performance of RACFSST is similar to that of CFSST; however, the bending moment capacity of RACFSST decreases with the increase of recycled aggregate replacement ratio. Based on the determination of the constitutive model of stainless steel and core recycled aggregate concrete, the flexural performance of RACFSST is simulated by a finite element analysis model developed using the software ABAQUS, and the predicted results generally agree well with the measured ones.

Key words: recycled aggregate concrete filled stainless steel tube; recycled aggregates; flexural performance; bending moment capacity; finite element analysis