

方钢管再生混凝土界面粘结性能试验

赵 强

(山西省建筑科学研究院, 山西 太原 030001)

摘要: 对 8 根钢管再生混凝土柱界面粘结性能进行研究,探讨再生骨料取代率及再生混凝土强度对钢管再生混凝土界面粘结性能的影响.结果表明:钢管再生混凝土荷载-滑移曲线大致经历无滑移阶段、应力上升段、应力下降段等 3 个阶段,不同再生骨料取代率的钢管再生混凝土荷载-滑移曲线具有类似的特征;再生骨料的取代率对钢管与再生混凝土界面粘结强度影响显著,再生骨料取代率越高,界面粘结强度越低;再生混凝土强度对钢管再生混凝土强度有一定影响,随着再生混凝土强度提升,粘结强度逐渐增加,但增幅逐渐降低.

关键词: 钢管混凝土; 再生混凝土; 粘结滑移; 粘结强度

中图分类号: TU 528 **文献标志码:** A

再生混凝土是在普通混凝土配合比基础上,采用废弃混凝土制成的再生骨料按一定比例取代天然骨料配置而成的混凝土^[1].再生混凝土的发展是实现建筑骨料资源再利用的有益途径,有利于节约资源、保护环境,符合建筑业持续绿色发展的理念.钢管再生混凝土的相关研究是目前的一大热点.由于再生骨料在既有建筑破碎拆除及后续加工处理中产生新的损伤,且再生骨料与水泥基体粘结强度较低,再生混凝土的力学及耐久性能均不及普通混凝土,再生混凝土与钢管界面粘结性能的研究也极为必要^[2-4].目前,已有较多学者对钢管再生混凝土构件力学性能进行了研究^[5-9].然而,关于钢管与再生混凝土两者之间的粘结性能的研究相对较少^[10-11].本文对 8 根方钢管再生混凝土界面粘结性能展开试验,分析再生粗骨料取代率、再生混凝土强度等级对钢管与混凝土界面粘结性能的影响.

1 试验概况

1.1 试验原材料及配合比

P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;再生粗骨料为某既有建筑物拆除产生(C30 碎石混凝土),经破碎、清洗、筛分后使用,粒径为 5.0~31.5 mm;天然粗骨料为碎石,石子粒径为 5.0~31.5 mm;中砂,细度模数为 2.4;自来水.试验再生粗骨料取代率分别为 0%,30%,50%,70%,100%.再生混凝土强度等级为 C30,C40,C50,C60.再生混凝土配合比(ρ)及测试强度(f_{cu}),如表 1 所示.试验钢管为钢板焊接而成,试验测得钢管屈服强度为 302.3 MPa,极限强度为 389.92 MPa,弹性模量为 1.932×10^5 MPa.

表 1 再生混凝土配合比及强度
Tab. 1 Mix proportion and compressive strength of recycled aggregate concrete

编号	强度等级	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$						f_{cu}/MPa
		水泥	石子	砂	再生骨料	水	附加水	
NSST-1	C30	395	1 170	590	0	200	0	36.4
RSST-2	C30	395	819	590	351	200	10	35.3
RSST-3	C30	395	585	590	585	200	16	34.9
RSST-4	C30	395	351	590	819	200	21	32.6

续表

Continue table

编号	强度等级	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$						f_{cu}/MPa
		水泥	石子	砂	再生骨料	水	附加水	
RSST-5	C30	395	0	590	1 170	200	29	31.5
RSST-6	C40	470	0	590	1 110	200	28	44.3
RSST-7	C50	545	0	590	1 044	200	27	53.1
RSST-8	C60	635	0	590	986	200	26	62.9

1.2 试验设计

试验共设计 8 根方钢管再生混凝土试件,试件为推出试件,试验变化的参数控制为再生骨料取代率和再生混凝土的强度等级,各试件编号如表 1 所示. 钢管再生混凝土试件高度为 500 mm,截面尺寸为 150 mm×150 mm,钢板厚度为 3 mm. 试件制作时,对混凝土充分振捣,在钢管一端预留 50 mm 长度作为自由端.

1.3 加载测试

推出试验采用位移控制加载,加载速度为 0.002 mm·s⁻¹. 加载时,在加载端设置略小于混凝土截面的钢垫块,垫块厚度为 40 mm,截面尺寸为 145 mm×145 mm. 在试件加载端和自由端两侧分别设置位移计,以采集加载端及自由端钢管与混凝土之间的相对滑移. 在试件加载前,应注意将试件对中,确保试件为轴心受压.

2 试验结果分析

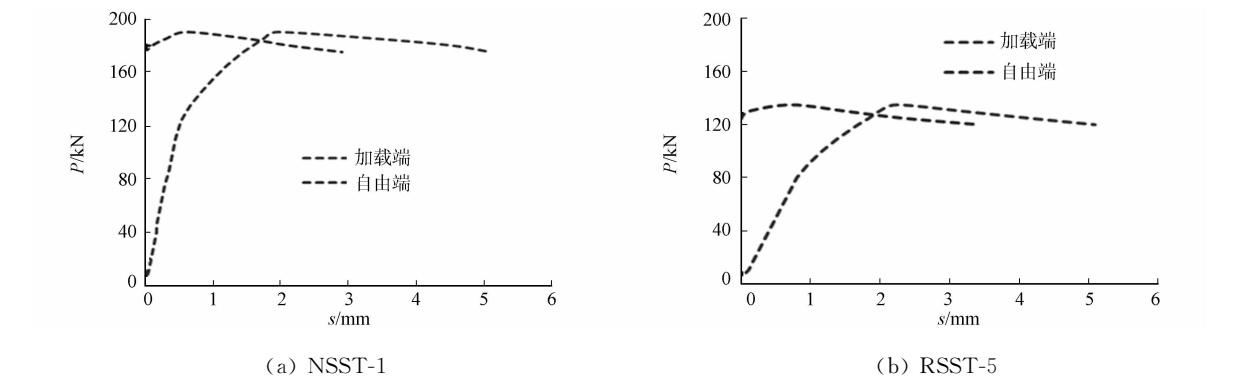
2.1 试件加载过程

在加载初期,钢管再生混凝土试件处于弹性受力的阶段,钢管与混凝土之间并无相对滑移. 此时,混凝土与钢管加载端之间粘结力主要为混凝土泊松效应产生的约束粘结作用,粘结力由混凝土向钢管传递;而自由端钢管与混凝土间主要为化学胶结力起着传递荷载的作用,荷载由钢管向混凝土传递. 随着荷载的继续增加,当荷载达到极限荷载 5%~15%时,加载端钢管与混凝土之间产生相对滑移,并伴随着“嘶嘶”声响. 继续加载,当荷载达到极限荷载 75%~85%左右时,加载时发出“吱吱”声响,伴随混凝土不断剥落,自由端和加载端相对滑移均持续增长,呈线性上升趋势,且两者数值逐步接近. 此时,仅试件中部存在化学胶结力,试件两端粘结力主要由机械咬合力构成. 进一步加载,钢管与混凝土两者之间产生相对刚体滑移,试件承受的荷载开始逐渐减小,再生混凝土与钢管界面化学胶结力被完全破坏. 此时,界面粘结力更多由钢管与混凝土间的粘结摩擦力承担.

试验结束后,所有钢管均未发生屈服,部分试件角部出现撕裂破坏,验证了角部对混凝土的约束作用. 钢管与混凝土接触界面存在一定量的混凝土粉末,这主要是钢管表面的凹凸界面与混凝土产生的机械咬合作用.

2.2 荷载-滑移曲线

不同再生骨料取代率和不同再生混凝土强度等级的钢管再生混凝土粘结滑移曲线呈现出类似的特征,部分典型的荷载-滑移(P - s)过程曲线,如图 1 所示.



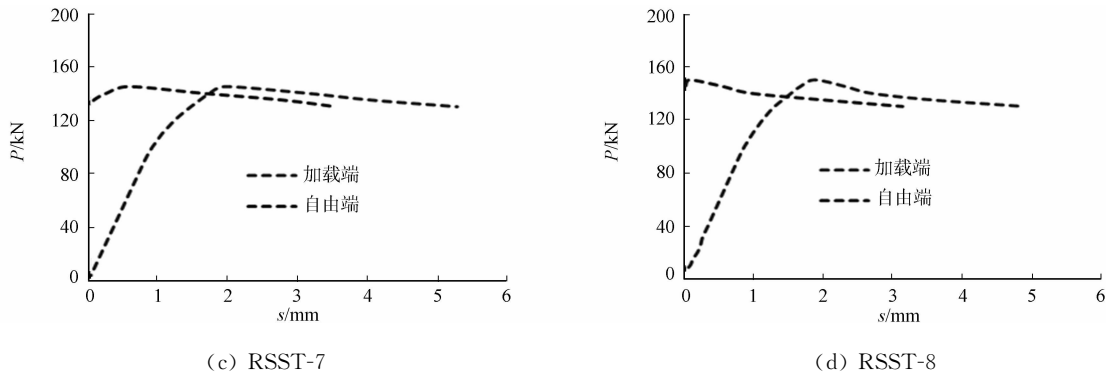


图 1 典型试件荷载-粘结滑移曲线
Fig. 1 Load-slip curves of typical specimens

钢管再生混凝土荷载-滑移曲线具有以下 3 点特性. 1) 钢管与混凝土之间滑移为持续累积的过程. 起初, 试件加载端产生局部滑移; 随后, 试件加载端滑移不断增大; 最后, 整个试件出现整体滑移. 2) 试件滑移最初出现在加载端, 当荷载达到极限荷载 60%~90% 时, 自由端才开始产生滑移, 加载端滑移量明显大于自由端. 3) 钢管再生混凝土荷载-滑移曲线可分为无滑移阶段、应力上升段、应力下降段等 3 个阶段. 无滑移阶段, 钢管与混凝土之间由于化学胶结力的作用, 钢管与混凝土之间无相对滑移; 应力上升段, 随着荷载的增加, 滑移值逐渐增大, 荷载滑移曲线斜率随后也开始降低, 当荷载达到钢管与混凝土间机械咬合力与化学胶结力之和时, 粘结-滑移曲线到达峰值点; 应力下降段, 曲线超过峰值荷载后开始走低部分. 此时, 整个试件产生整体滑移, 化学胶结力已完全失去, 界面粘结力由钢管与混凝土之间的摩擦及残余的机械咬合力提供.

3 界面粘结性能分析

在试件界面粘结强度测试时, 共准备 8 组方钢管再生混凝土推出试件, 为确保试验结果的可重复性, 每组共制备 3 个试件, 以测试再生方钢管混凝土平均粘结强度. 在粘结强度计算时, 假定试件混凝土埋置长度内粘结应力均匀分布, 采用起滑移粘结强度 τ_a 、极限粘结强度 τ_u 评价钢管与再生混凝土间的粘结性能. 起滑移粘结强度和极限粘结强度计算公式为

$$\tau_a = P_a / (4DL), \tag{1}$$

$$\tau_u = P_u / (4DL). \tag{2}$$

式(1), (2)中: τ_a 为钢管与混凝土间起滑移粘结强度, MPa; τ_u 为极限粘结强度, MPa; P_a 为起滑移粘结作用荷载, N; P_u 为极限粘结作用荷载, N; D 为钢管内边长, mm; L 为钢管与混凝土粘结长度, mm.

3.1 再生骨料取代率对钢管再生混凝土界面粘结强度影响

再生骨料取代率(η)对钢管再生混凝土起滑移粘结强度(T_a)及极限粘结强度(T_u)的影响, 如图 2, 3 所示.

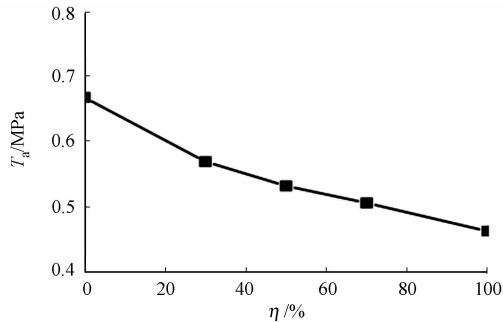


图 2 再生骨料取代率对起滑移粘结强度影响
Fig. 2 Influence of replacement ratio of recycled aggregate on starting bonding strength

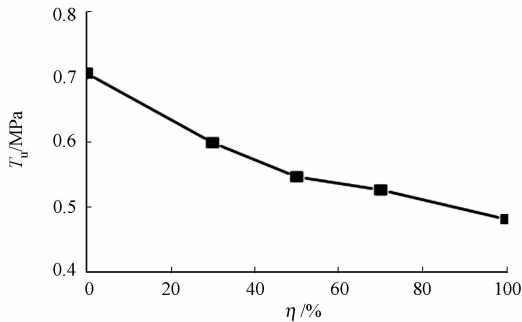


图 3 再生骨料取代率对极限粘结强度影响
Fig. 3 Influence of replacement ratio of recycled aggregate on ultimate bonding strength

由图 2 可知:再生粗骨料取代率为 0%~100%的钢管再生混凝土起滑移粘结强度为 0.463~0.667 MPa,再生骨料取代率越大,钢管与再生混凝土界面起滑移粘结强度越小.当未掺加再生骨料时,钢管混凝土界面的起滑移粘结强度为 0.667 MPa,而当再生骨料取代率为 100%时,起滑移粘结强度则降至 0.463 MPa,起滑移粘结强度最大下降幅度达到 30.58%.

由图 3 可知:不同再生骨料取代率的钢管再生混凝土极限粘结强度为 0.481~0.704 MPa,再生骨料对混凝土与钢管间界面粘结强度产生明显不利影响,再生骨料取代率越大,钢管与混凝土界面极限粘结强度越低;再生骨料取代率为 0%时,极限粘结强度最大,约为 0.704 MPa;当再生骨料取代率为 100%时,极限粘结强度降至最低,约为 0.481 MPa.

因此,再生粗骨料的掺加不利于钢管再生混凝土界面粘结性能.通过试验数据分析可知:当在实际工程中使用钢管再生混凝土时,应考虑再生骨料掺入对粘结强度的不利影响,折减系数应根据再生骨料掺量选取,折减系数最低取 0.69.相比于普通混凝土,再生混凝土有更大的体积收缩率,随着再生骨料取代率的增加,再生混凝土体积收缩率也逐渐增大,再生混凝土相对较大的体积收缩不利于再生混凝土与钢管之间机械咬合力及化学胶结力.

此外,再生骨料在破碎过程中容易产生内部缺陷,再生骨料强度低于天然骨料,且部分骨料表面附着有水泥砂浆,这些都不利再生混凝土与钢管之间机械咬合力及两者界面摩阻力,进而对钢管再生混凝土界面粘结强度产生不利影响.

3.2 再生混凝土强度对钢管再生混凝土界面粘结强度影响

再生混凝土强度对钢管再生混凝土初滑移粘结强度及极限粘结强度的影响,如图 4,5 所示.

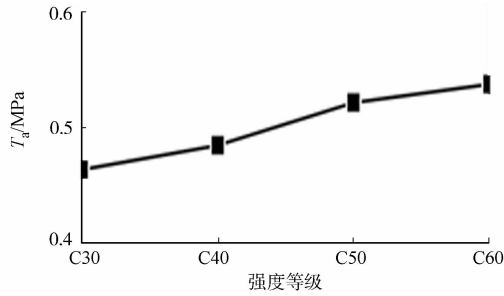


图 4 混凝土强度等级对起滑移粘结强度影响
Fig. 4 Influence of strength grade of concrete on starting bonding strength

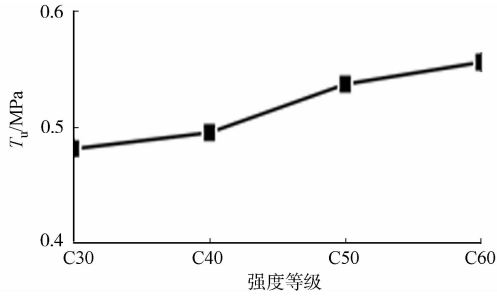


图 5 混凝土强度等级对极限粘结强度影响
Fig. 5 Influence of strength grade of concrete on ultimate bonding strength

由图 4 可知:再生混凝土的强度对钢管与再生混凝土界面粘结强度影响明显,再生混凝土强度等级越高,钢管再生混凝土起滑移粘结强度呈现出增大趋势.再生混凝土强度等级为 C30~C60 时,界面初滑移粘结强度为 0.463~0.537 MPa.当再生混凝土强度等级为 C30 时,钢管再生混凝土起滑移粘结强度为 0.463 MPa;当再生混凝土强度等级为 C60 时,钢管再生混凝土起滑移粘结强度为 0.537 MPa,粘结强度提升幅度为 13.78%.

由图 5 可知:不同强度等级钢管再生混凝土界面极限粘结滑移强度为 0.481~0.556 MPa,再生混凝土强度等级越高,界面极限粘结滑移强度越大.当再生混凝土强度等级为 C30 时,钢管再生混凝土极限粘结强度为 0.481 MPa,而当再生混凝土强度等级为 C60 时,极限粘结强度达到最大,达到 0.556 MPa,极限粘结强度增幅为 15.59%.

由此可知:混凝土强度等级较高有利于提高再生混凝土与钢管两者间机械咬合力,进而可以提高钢管再生混凝土界面的粘结强度.与此同时,再生混凝土强度等级不断地提高,钢管与混凝土间粘结强度增幅却逐渐减少,这主要是由于高强度等级混凝土较大的体积收缩性降低了钢管与混凝土之间的化学胶结力.

因此,尽管再生混凝土强度等级有利于提高钢管再生混凝土界面粘结强度,但提升幅度较小,且当混凝土强度不断提高时,混凝土体积收缩也会在一定程度上影响混凝土与钢管之间的粘结.在实际中,不可过于依靠提高再生混凝土强度等级来改善钢管再生混凝土界面粘结强度.

4 结 论

- 1) 不同再生骨料取代率对钢管再生混凝土荷载-滑移过程曲线呈现出类似的变化规律,均经历无滑移阶段、应力上升段、应力下降段等 3 个阶段. 试件滑移先在加载端出现,加载端滑移量大于自由端.
- 2) 再生粗骨料取代率对钢管再生混凝土粘结强度影响较为明显,再生粗骨料取代率越大,钢管与再生混凝土两者界面粘结强度也就降低. 当再生骨料掺量为 100%时,钢管再生混凝土粘结强度降幅最大,达到 31.68%. 在钢管再生混凝土实际应用中,应考虑再生粗骨料取代率导致界面粘结强度的下降.
- 3) 再生混凝土强度对再生钢管混凝土粘结强度影响较为显著,混凝土强度等级增大,界面粘结强度也呈现增大趋势,但增幅却逐渐减小.

参考文献：

[1] 肖建庄,李佳彬,兰阳. 再生混凝土技术最新研究进展与评述[J]. 混凝土,2003,25(10):17-20,57.

[2] 李坤,张英华. 再生混凝土粗骨料的基本性能试验研究[J]. 建筑科学,2006,22(5):58-60,99.

[3] XIAO Jianzhuang,LI Jiabin,ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. Cement and Concrete Research,2005,35(6):1187-1194.

[4] 施养杭,吴泽进,彭冲,等. 再生粗骨料混凝土棱柱体抗压强度试验研究[J]. 建筑科学,2011,27(9):44-47.

[5] YANG Youfu,HAN Linhai. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research,2006,62(12):1310-1324.

[6] 吴波,刘伟,刘琼祥,等. 钢管再生混合短柱的轴压性能试验[J]. 土木工程学报,2010,43(2):32-38.

[7] 王玉银,陈杰,纵斌,等. 钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(12):170-177.

[8] 张兆强,熊高辉,杨丽萍,等. 无端板方钢管再生混凝土短柱轴向局部受压性能试验研究[J]. 建筑科学,2014,30(5):73-77.

[9] LIU Yixiang,ZHA Xiaoxiong,GONG Guobin. Study on recycled-concrete-filled steel tube and recycled concrete based on damage mechanics[J]. Journal of Constructional Steel Research,2012,71(4):143-148.

[10] 陈宗平,徐金俊,李卫宁,等. 再生粗骨料含量对钢管再生混凝土粘结强度及失效性态的影响研究[J]. 工程力学,2014,31(6):70-78.

[11] 张卫东,王振波,孙文彬,等. 方钢管再生混凝土界面粘结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构,2015,45(8):64-68.

Test on Bond Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubes
Between Steel and Recycled Coarse Aggregate Concrete

ZHAO Qiang

(Shanxi Construction Science Academy, Taiyuan 030001, China)

Abstract: To investigate the influence of different ratio and strength grade of recycled aggregate concrete on interfacial bond performance of concrete filled steel tube, the bond behavior of eight pieces of recycled aggregate concrete-filled steel tube is studied. The results indicate that load-slip curve of recycled aggregate concrete-filled steel tube consists of three stages, including the no slip stage, stress increase stage and stress decrease stage. The load-slip curves steel with different recycled aggregate replacement ratios have similar characteristics. The replacement ratio of recycled aggregate has a significant negative effect on the bond strength. With the increase of the replacement ratio of recycled aggregate, the bond strength decreases gradually. The strength of recycled concrete has a certain effect on the bond strength. With the increase of the strength of recycled aggregate concrete, the bond strength increases gradually, but the increase percent reduces gradually.

Keywords: concrete-filled steel tube; recycled aggregate concrete; bond slip; bond strength