

文章编号:1671-6833(2014)05-0087-05

掺废混凝土块的钢管再生混合轴压短柱试验研究

张卫东¹, 王振波², 孙文彬¹

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 通过钢管再生混合短柱的轴压试验, 研究了强度低于普通混凝土的废弃混凝土块体掺入率对构件的宏观变形特征、荷载—竖向变形关系和承载力—掺入率的影响, 验证了目前钢管混凝土三种计算理论计算公式的适用性. 研究表明: 钢管再生混合短柱轴压破坏形态与钢管普通构件相似; 极限承载力随着废弃混凝土块体掺入率的增加而降低, 最大降幅约为 14%, 但均显示出较好的延性. 通过对比分析, 从不同角度出发推荐了不同的钢管再生混合短柱轴压承载力计算公式.

关键词: 废弃混凝土块体; 钢管混凝土; 轴压试验; 掺入率

中图分类号: TU392.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.020

0 引言

废弃混凝土的再生利用有利于节省资源、保护环境, 具有重大的意义. 近年来国内外学者在此方面进行了大量研究, 主要集中在两个方面: ①将废弃混凝土破碎后形成再生混凝土骨料, 从而浇筑钢筋再生混凝土构件或结构, 在此方向肖建庄等^[1]学者做了大量的研究; ②考虑到组合结构的受力特点, 将再生混凝土骨料用于组合结构, 制成钢管再生混凝土或钢筋再生混凝土构件, 在此方面 Konno^[2]及杨有福等^[3-4]学者得出了大量的结论.

目前钢管再生混凝土构件中废弃混凝土粒径一般为 5~20 mm, 因此必须对废弃混凝土进行破碎、筛分, 整个过程工序繁琐, 而且破碎过程中会对废弃混凝土内部造成一定的损伤. 为了降低废弃混凝土的损伤及更方便地利用废弃混凝土, 可将废弃混凝土块体直接掺入到钢管普通混凝土试件中, 制成钢管再生混合构件. 在此方面吴波^[5]开展了废弃混凝土与现浇混凝土抗压强度大致相当的钢管再生混合构件的试验研究, 其利用废弃混凝土的形式为节段和块体两种, 其研究表明: 采用了 32%~35% 的废弃混凝土的钢管再生混合短柱轴向受力性能与全现浇钢管混凝土短柱

相当.

钢管混凝土构件中混凝土的强度等级一般在 C40 以上, 而废弃混凝土的抗压强度一般均低于 C40, 因此有必要研究抗压强度低于现浇混凝土的废弃混凝土块体掺入到钢管混凝土短柱对钢管再生混合构件力学性能的影响. 鉴于此, 笔者进行了钢管再生混合结构的轴压试验, 研究了其承载能力、变形特征、荷载—竖向变形曲线等性能指标, 分析了中美日规范中计算公式的适用性, 进一步推动废弃混凝土在钢管混凝土结构中的应用.

1 试验研究

1.1 材料性能及试件设计

本次试验共 9 根试件, 按废弃混凝土块体掺入率分为 3 组, 为了保证废弃混凝土块体能被普通混凝土包裹, 掺入率取为 0、20%、30%, 编号分别为 K-0、K-20、K-30 每组 3 根.

废弃混凝土块体原抗压强度等级约为 C25, 为市河东自来水管厂的混凝土经简单破碎后形成, 粒径大致为 40~100 mm; 水泥为淮河牌 42.5 级普通硅酸盐水泥; 天然粗骨料为连续级配的碎石, 最大粒径为 20 mm; 砂子为普通河砂, 细度模数 2.4.

因废弃混凝土块体粒径较大, 故立方体试块

收稿日期: 2013-12-24; 修订日期: 2014-01-14

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术项目(2008-k1-11); 省教育厅自然科学基金项目(11KJD560003); 宿迁市科技局项目(B2010021); 江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象资助.

作者简介: 张卫东(1981-), 男, 汉族, 江苏南通人, 淮阴工学院讲师, 硕士, 主要从事钢管再生混凝土结构研究. E-mail: jsntzwd@163.com.

尺寸选为 200 mm × 200 mm × 200 mm, 每一个废弃混凝土块体质量掺入率的立方体试件均为 3 个, 制作立方体试块时直接将废弃混凝土掺入普通混凝土中, 普通混凝土采用强制式搅拌机拌和, 普通混凝土的质量配合比 C: S: G: W = 430: 574: 1 237: 185. 标准养护 28 d 后, 依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2002^[6]测得混凝土的抗压强度, 利用尺寸换算系数求出 f_{cu} , 具体见表 1.

本次试验所有试件的截面尺寸都一样, 其中钢管直径 D × 壁厚 t × 长度 l 为 219 mm × 6 mm × 657 mm, 钢管采用直缝焊接圆钢管, 依据《金属拉伸试验方法》GB/T 228—2002^[7]测得钢材屈服抗拉强度、弹性模量和屈服应变等性能(表 1).

表 1 混凝土及钢材力学性能

Tab. 1 The mechanical properties of concrete and steel

f_{cu}/MPa			f_s/MPa	f_u/MPa	E_s/Pa	$\varepsilon/\mu\varepsilon$
NC	NRC20	NRC30				
38.6	27.6	23.2	392.6	445	205 689	1 852
(40.53)	(28.98)	(24.36)				

注: NC 表示普通混凝土; NRCr 中 NRC 表示掺入再生混凝土块体的混凝土, r 表示废弃块体质量掺入率; 括号内为 150 mm 立方体抗压强度.

浇筑之前, 每根钢管一端用厚度为 10 mm、长度为 200 mm 的方形钢板焊接封固作底板, 并保证钢板与钢管几何对中. 浇筑时, 首先从顶部灌入深度约为一个钢管直径普通混凝土, 并插入振捣棒进行振捣, 随之投入废弃混凝土块体, 并让废弃混凝土块体被普通混凝土包裹, 再浇筑普通混凝土并振捣, 类似交替进行, 直到钢管填满. 试件养护方法为自然养护, 一周后凿去表面浮浆, 用高强环氧砂浆将敞口处抹平, 硬化后将试件表面打磨平整并焊好钢板, 保证加载初期钢管与核心混凝土能共同受力. 废弃混凝土块体及试件浇筑过程中的图片见图 1 及图 2 所示.



图 1 废弃混凝土块体

Fig. 1 Waste concrete block



图 2 试件制作

Fig. 2 Making of specimens

1.2 试验结果与分析

1.2.1 试验结果

试验装置及测点布置如图 3 所示. 试验过程中发现三类短柱具有相似的破坏过程, 均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段. 在各自极限承载力的 65% 左右, 钢管中部表面油漆开始开裂, 达到极限承载力 80% 时开始出现剪切滑移线; 在各自极限承载力的 90% 左右, 肉眼可见钢管壁部位微微鼓起; 在试件达到极限荷载后, 随着试件所能承受的荷载的逐渐下降, 试件中部发生明显的鼓曲; 试件破坏时中部伴有局部鼓曲发生, 但其后期承载力及变形显示其具有较好的后期承载力和延性. 卸载过程中, 试件具有回弹的现象. 试验后切开钢管发现混凝土已经压碎, 表明混凝土均处于三向受力状态. 试件的典型破坏形态见图 4.

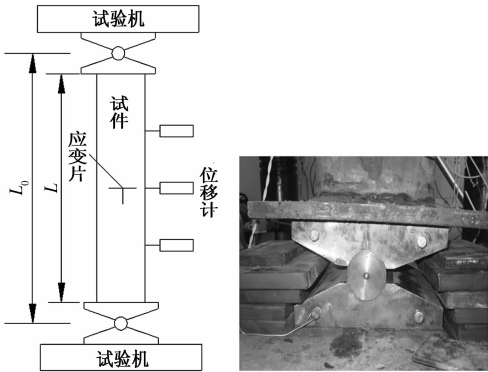


图 3 试验装置及测点布置

Fig. 3 Test device and measuring point arrangement

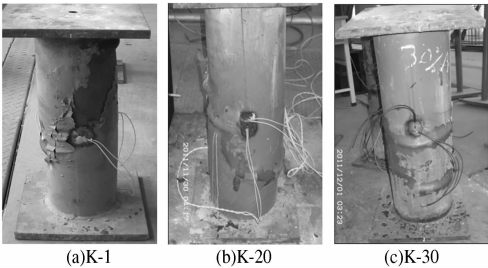


图 4 轴压试件破坏形态

Fig. 4 The failure mode of specimens under axial compression

表 2 试件一览表

Tab.2 Schedule of specimens

序号	编号	f_{cu}/MPa	废弃混凝土块体掺入率	极限承载力/kN	
				实测值 N_u	平均值 \bar{N}_u
1	K-0-1	40.53	0	2 861.8	2 836
2	K-0-2			2 848.7	
3	K-0-3			2 790.5	
4	K-20-1	28.98	20%	2 617.5	2 545.6
5	K-20-2			2 478.8	
6	K-20-3			2 540.6	
7	K-30-1	24.36	30%	2 320.2	2 430.3
8	K-30-2			2 485.4	
9	K-30-3			2 275.3	

注:K-X-Y 中 X 表示废弃混凝土块体的质量掺入率,Y 表示试件标号。

1.2.2 破坏形态及分析

由图 5 分析可知:①三类短柱在弹性阶段的荷载—竖向变形曲线相似,接近重合,表明所有试件具有几乎相同的初始刚度,掺入率对试件的刚度影响较小;②当轴压荷载超过比例极限后,三者的荷载—竖向变形曲线不再保持线性关系,位移增长速度均高于荷载增长速度,表明试件均进入弹塑性变形阶段,但同时也显示出掺入率越高试件进入弹塑性阶段时轴压荷载越小的趋势;③三类轴压短柱的后期荷载—竖向变形曲线接近平行,均显示出了相似的、较好的延性特征。

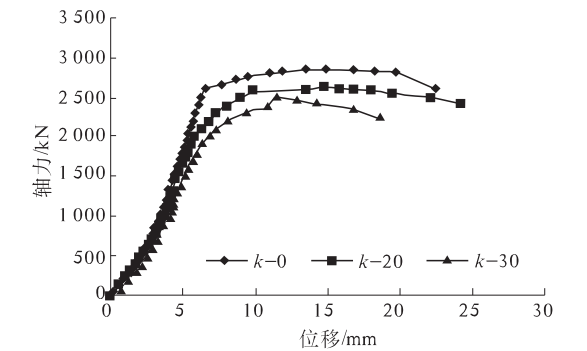


图 5 荷载—竖向变形关系曲线

Fig.5 The relationship curve of load-vertical deformation

1.2.3 掺入率对试件承载力的影响分析

图 6 中为本次试验中轴压试件承载力与掺入率的关系曲线。由图可知,随着废弃混凝土块体掺入率增大,试件轴压承载力呈现逐渐下降的趋势。掺入率为 20% 和 30% 时,轴压极限承载力分别约为普通钢管混凝土短柱的 89.8% 和 85.3%。

究其原因主要由以下两点。①废弃混凝土块体具有亲水性,掺入到普通混凝土中后会在其表

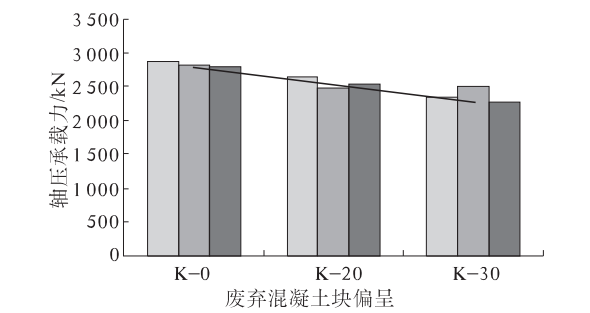


图 6 轴压承载力—掺入率关系

Fig.6 The relationship of bearing capacity-incorporation rate

面形成一层水膜,且普通混凝土中气泡易积聚在废弃混凝土表面,进而降低两者之间的粘结强度,导致掺有废弃混凝土的混凝土强度等低于普通混凝土,且随着废弃混凝土掺入率的增大而降低,进而导致钢管承受更大的荷载,较快达到屈服强度。②由于废弃混凝土块体表面的孔隙特征和吸水特性等性质与天然骨料存在很大差异,导致掺入废弃混凝土块体的混凝土的收缩量加大,且随着掺入率的增大而增大,进而核心混凝土与钢管之间缝隙越来越大,对钢管壁的支撑作用降低,降低了钢管壁的几何稳定性,导致钢管提前发生局部屈曲。

在这两者共同影响下,导致钢管再生混合构件承载力随着掺入率的增加而降低。

2 计算比较

通过对国内外 10 余种关于钢管混凝土的规程的分析,可知钢管混凝土短柱承载力的计算公式的理论主要为套箍理论、统一理论和叠加理论三种。鉴于此,笔者选择体现上述理论的 5 种规程,分别为 CECS230:2008《高层建筑钢—混凝土混合结构设计规程》^[10]、电力行业标准 DL/T 5085—1999《钢—混凝土组合结构设计规程》^[11]、美国钢结构协会 AISC—LRFD (1999)^[12]、英国标准协会 BS5400 (1979)^[13] 和日本建筑学会 AIJ—CFT (1997)^[14],每种规程具体体现的计算理论如表 3 所示。为了验证以上规程计算钢管再生混合短柱轴压承载力的适用性,通过计算并与试验结果进行对比,具体见表 3。各规程计算的试件抗压承载力的统计精度见表 4。

(1) 基于叠加理论考虑核心混凝土强度提高的英国标准协会 BS5400 (1979) 规程计算的轴压

表 3 试验值与代表性规程承载力计算值比较

Tab.3 The comparison between the experimental values and the calculation results

计算理论	编号	f_{cu}/MPa	N_u/kN	\bar{N}_u/kN	\bar{N}_u/N_u
基于套箍理论考虑	K-0	40.53	2 538	2 836	1.117
核心混凝土提高	K-20	28.98	2 245	2 545.6	1.134
CECS	K-30	24.36	2 116	2 430.3	1.148
基于统一理论考虑	K-0	40.53	2 544	2 836	1.115
核心混凝土	K-20	28.98	2 336	2 545.6	1.090
提高 DL/T	K-30	24.36	2 265	2 430.3	1.073
基于叠加理论不考	K-0	40.53	2 423	2 836	1.170
虑承载力提高	K-20	28.98	2 186	2 545.6	1.165
AISC-LRFT	K-30	24.36	2 091	2 430.3	1.162
基于叠加理论考虑	K-0	40.53	2 894	2 836	0.979
核心混凝土提高	K-20	28.98	2 718	2 545.6	0.936
BS5400	K-30	24.36	2 648	2 430.3	0.917
基于叠加理论考虑	K-0	40.53	2 619	2 836	1.082
钢管承载力提高	K-20	28.98	2 396	2 545.6	1.062
AIJ-CFT	K-30	24.36	2 306	2 430.3	1.054

表 4 计算结果的统计特性

Tab.4 The statistical characteristics of calculation results

统计特 征值	实测均值承载力/理论计算承载力				
	CECS	DL/T	AISC-LRFT	BS5400	AIJ-CFT
均值	1.133 2	1.092 6	1.165 8	0.944 0	1.599 0
标准差	0.015 5	0.021 1	0.004 0	0.031 7	0.014 4
变异系数	0.013 7	0.019 3	0.003 5	0.033 6	0.009 0

承载力偏大,超过实测均值承载力,笔者认为其不适用于钢管再生混合构件。

(2)除 BS5400 外,废弃混凝土块体掺入率在 30% 以内其余规程计算值均未超过实测值,均可作为钢管再生混合构件的计算公式。

(3)从实测值与计算值的比值可知,采用 AISC-LRFD (1999) 计算其承载力富余度最大,且从均值、标准差及变异系数可知其计算精度也最高,可作为钢管再生混合构件的承载力计算公式;若考虑我国设计人员的习惯,CECS230:2008 规程中轴压承载力计算公式也可作为钢管再生混合构件抗压承载力的计算公式。

3 结论

(1)钢管再生混合短柱轴压破坏形态与钢管普通构件相似,经历了弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段,都具有较好的延性和后期承载力。

(2)废弃混凝土块体的掺入率对构件的轴压承载力有较大的影响,显示出随掺入率的增加而

承载力降低的趋势,最大降幅约为 14%。

(3)从计算精度及承载力富余度出发,笔者推荐采用 AISC-LRFD (1999) 中计算公式,若综合考虑我国设计人员习惯采用立方体抗压强度,笔者建议可选用 CECS230:2008 中承载力计算公式。

参考文献:

[1] 王长青,肖建庄. 再生混凝土框架结构模型振动台试验[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(12):1766-1772.

[2] KONNO K, SATO Y, UEDO T, et al. Mechanical property of recycled concrete under lateral confinement[J]. Transaction of the Japan Concrete Institute, 1988,20(3):287-292.

[3] 杨有福,韩林海. 钢管再生混凝土结构工作机理的若干关键问题研究[C]//全国首届再生混凝土研究和应用学术交流会,2008.

[4] YANG You-fu, HAN Lin-hai. Experimental behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(12): 1310-1324.

[5] 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.

[6] GB/T 50081—2002,普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[7] GB/T 228—2002,金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[8] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.

[9] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论——研究与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[10] CECS230:2008 高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程[S]. 北京:中国计划出版社. 2008.

[11] DL/T 5085—1999 钢-混合体组合结构设计规程[S]. 北京:中国电力出版社,1999.

[12] AISC /LRFD(1999) Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S]. American Institute of Steel Construction, INC, 1999.

[13] BS 5400(1979) Steel concrete and composite bridges[S]. British Standards Institution, 1979.

[14] AIJ-CFT(1997) Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S]. Architectural Institute of Japan (AIJ),1997.

Experimental Study on the Behavior of Concrete Filled Steel Tubes with Waste Concrete Block Subjected to Axial Load

ZHANG Wei-dong¹, WANG Zhen-bo², SUN Wen-bin¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Based on axially compressive tests of concrete filled steel tubes short columns with waste concrete block, the influence of incorporation rate of lower compressive strength to macroscopic characters of deformation, load – vertical deformation curves and bearing capacity-incorporation rate were studied, and applicability of three theoretical calculation formulas of concrete filled steel tubes were analyzed. The test results demonstrate that failure mode, ductility and later bearing capacity of concrete filled steel tubes short columns with waste concrete block is similar to concrete filled steel tubes, but the bearing capacity will decrease when incorporation rate of waste concrete block increases, and the maximum amplitude is 14%. Based on the comparison between the results of three calculation theories and test results, different calculation formulas are recommended from different aspects.

Key words: waste concrete block; concrete filled steel tube; axial compression test; incorporation rate

(上接第 73 页)

Numerical Analysis and Failure Characteristics of Uniaxial Compression for Interlayered Rock Mass

JIA Shan-po^{1,2}, LUO Jin-ze¹, WU Bo³, XI Zeng-qiang²

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield, Renqiu 062552, China; 3. China Nuclear Industry Zhongyuan Construction Company Limited, Beijing 100037, China)

Abstract: In view of the failure characteristics of layered rock mass, a series of physical experiments were carried out in this paper. The disruption and strength features of the layered rock in the case of uniaxial compressive are discussed to explore the discipline of the dip angle and interlayer changes effect on strength and breakage of rock mass. The test results show that the rock mass destruction modes are mainly rock destruction for small dip angle ($\theta < 45^\circ$), interlaminar shear failure with the dip angle increases ($45^\circ \leq \theta < 75^\circ$) and layer directly damage with local splitting failure for the dip angle of 90° . Abaqus software was used for the numerical simulation on the above model tests. The theoretical analysis and numerical simulation show that the compressive strength of rock is first decreased and then increased with the “U”-shaped distribution. The calculation results are consistent with the results of laboratory test.

Key words: layered rock mass; laboratory test; failure characteristic; inclination angle; numerical simulation