

内置大块体矿渣薄壁钢管混凝土短柱 轴压力学性能试验

闻 洋,于 洋,管丽佩

(内蒙古科技大学建筑与土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要 目的 探究内置大块体矿渣钢管混凝土短柱的力学性能,以指导工程实际。
方法 对12个内置大块体矿渣钢管混凝土短柱进行静力试验;以短柱截面含钢率、大块体矿渣替代率以及核心混凝土强度等级为变量,分析各参数对构件轴压力学性能变化影响的敏感程度,并提出内置大块体矿渣短柱极限承载力计算公式。
结果 各试件均发生剪切破坏,混凝土强度越高,荷载位移曲线下降段越陡,延性越差。矿渣柱的承载力随着混凝土强度、取代率和含钢率的增加而增大;其中以混凝土强度对承载力的影响最大,含钢率次之,替代率的影响最小,设计时可忽略。
结论 利用笔者提出的轴压极限承载力计算公式所得结果与试验结果吻合良好,可为工程实际计算提供参考。

关键词 矿渣混凝土;大块体矿渣;含钢率;取代率;敏感程度

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Experimental Study on Axial Compressive Properties of Short Steel Tube Columns Filled with Slag Concrete and Bulk Slag

WEN Yang, YU Yang, GUAN Lipei

(School of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010)

Abstract: In order to explore the mechanical properties of steel tube short columns filled with slag concrete and bulk slag and use it to make instructions. The axial compressive behavior of steel stub columns filled with slag concrete and bulk slag were studied through static test. Considering the variable parameters of the steel ratio, replacement rate of slag and the concrete strength, the sensitivity of the various parameters on the of axial pressure mechanical properties is analyzed and the bearing capacity calculation formula of the steel stub columns filled with slag concrete and bulk slag is proposed. Test results indicate that the shear failure occurs in each specimen, the higher the concrete strength is, the steeper the decline of load-displacement curve is. The ductility decreases

收稿日期:2017-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51068021);内蒙古自治区自然科学基金项目(2013MS0715)

作者简介:闻洋(1976—),男,副教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构方面研究。

with the rise of the concrete strength. The ultimate bearing capacity increases with the increasing of the strength of the core concrete, steel ratio and the replacement rate; the strength of the concrete is the most, the steel ratio is less; the substitution rate has little influence on it. So the replacement rate can be ignored on designing. The calculation results of axial compressive bearing capacity agree well with the test results. So it can be used as the reference standards for engineering design.

Key words: slag concrete; bulk slag; steel ratio; replacement rate; sensitivity

据统计我国每年产生约 2.1 亿 t 工业矿渣,其综合利用率却仅仅 36.7% 左右^[1-2],即每年约有 1.33 亿 t 的工业矿渣无法利用,对植被和生态环境破坏严重.环保形势异常严峻,大幅提高工业矿渣的综合利用率迫在眉睫.

与普通钢管相比,薄壁钢管可大大减少材料用量和焊接量,但同时也由于管壁径厚比大,易出现局部屈曲而被限制使用^[3-10].随着近年来薄壁钢管混凝土结构的推广^[11-15],促使将大尺度工业矿渣、全矿渣混凝土与薄壁钢管组合使用,从力学角度解决了其不宜在工程中应用的难题.

目前国内对工业矿渣的研究主要集中在材料方面^[16-20],建筑结构方面尚不普遍.基于以上考虑,笔者设计制作 12 个内置大块体工业矿渣薄壁钢管混凝土短柱,通过静力试验得到各柱的破坏模式、荷载-变形曲线与荷载应变曲线,分析各因素对承载力的影响程度,并提出短柱荷载计算公式.研究成果为提高工业矿渣综合利用率,编制我国的相关技术标准提供了理论基础和试验依据.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

选用粒径范围在 40~80 mm 的矿渣块体,普通硅酸盐水泥,天然河沙及粒径范围在 5~30 mm 碎石矿渣.制作 12 个内置大尺度矿渣钢管矿渣混凝土短柱,以 Q235 碳素钢为外钢管材料,采用 219 mm 外径、660 mm 高的直缝圆钢管.两端焊 300 mm×300 mm×12 mm 的方形盖板.钢管加工后先与钢管下端盖板焊接,待钢管中混凝土浇筑

养护完毕后抹平上端,焊接上部盖板,所有焊缝均保证质量.以截面含钢率、大块体矿渣替代率和管内混凝土强度为变量.详细参数见表 1.

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of the specimens

试件编号	钢管壁厚/mm	含钢率/%	矿渣块体取代率/%	矿渣混凝土强度等级
30-1-A	3.0	5.7	0	C30
30-2-A	3.0	5.7	10	
40-3-A	4.0	7.7	15	
35-4-A	3.5	6.7	20	
35-1-B	3.5	6.7	0	C40
35-2-B	3.5	6.7	10	
30-3-B	3.0	5.7	15	
40-4-B	4.0	7.7	20	
40-1-C	4.0	7.7	0	C45
40-2-C	4.0	7.7	10	
35-3-C	3.5	6.7	15	
30-4-C	3.0	5.7	20	

1.2 材料力学性能

试验钢材选取 Q235 碳素钢,根据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228—2002)中的规定制作三个不同厚度的标准拉伸试样,钢材力学性能指标见表 2.

表 2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of the steel

厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/10 ⁵ MPa	泊松比	伸长率/%
3.0	325	423	2.13	0.230	17.78
3.5	338	429	1.81	0.278	16.57
4.0	325	396	1.97	0.298	18.98

混凝土采用与钢管内部矿渣混凝土相同材料,制作边长为 100 mm 的不同矿渣混凝土

土强度的立方体试块,与试件同条件养护28 d后,依据《普通混凝土力学性能试验方法》测定混凝土抗压强度,结果如表3.

表3 核心矿渣混凝土的力学性能

Table 3 Mechanical properties of the core slag concrete			
混凝土强度等级	28 d 立方体抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
C30	34.7	3 130	0.209
C40	44.5	3 370	0.211
C45	50.1	3 480	0.218

1.3 加载与测量

试验在内蒙古科技大学建筑结构研究所5 000 kN 压力试验机上进行,加载装置如图1所示.加载采用分级加载制度,正式加载之前进行预加载,每级增量取构件预估极限荷载的5%,分三级加载完成.随后进入极限加载阶段,每级增量为极限荷载的10%,当荷载接近钢材屈服点或钢管表面出现部分屈曲时,每级荷载增量为预计极限荷载的5%,直至试件发生较大变形后,试验终止.

在试件上部端板与加载板接触位置沿角部安放4个位移计以测定柱受压状态下的整体变形.短柱中部沿钢管表面周长每隔90度布设一个应变花用以测量钢管的纵横向应变,位移计和应变花的布置见图2.



图1 加载装置示意图

Fig. 1 The loading device

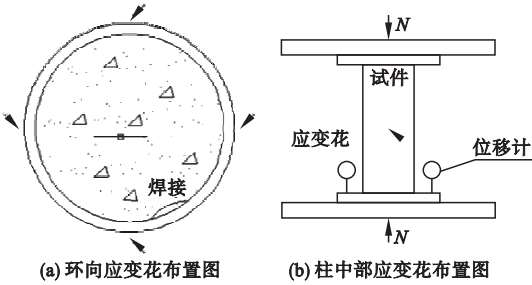


图2 应变花沿钢管四周布置图

Fig. 2 Strain flowers around the steel tubes

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程及形态

根据所有试件的破坏情况可知,构件基本均发生核心混凝土剪切破坏,部分试件破坏形态见图3.

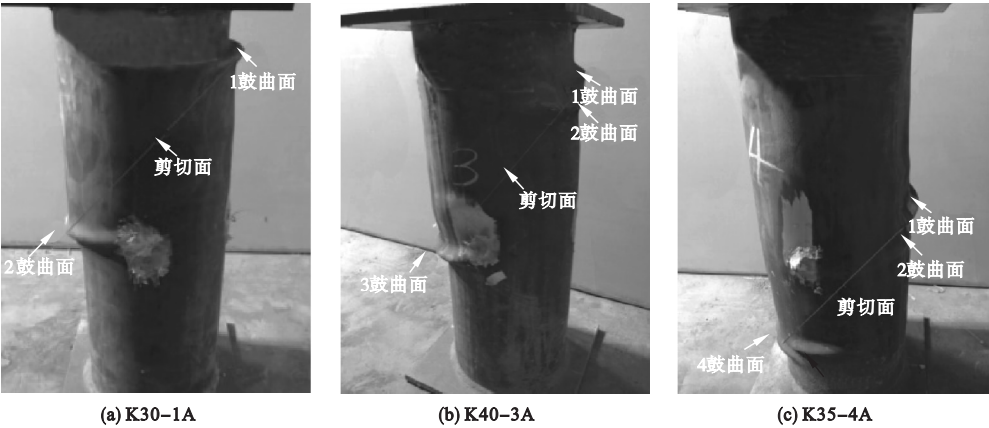


图3 典型试件破坏图

Fig. 3 Failure characteristic of the typical specimens

对于含钢率为 5.7% 的试件,以 K30-1A 为例,加载初期,构件表面未发生明显变化,混凝土柱处于弹性工作阶段;荷载加载到 1 430 kN 时,试件顶端呈现少量的剪切滑移线;继续加载,当荷载到达 1 820 kN 时,观察试件发现剪切滑移线增多且向中部发展.荷载继续增大,当达到 1 880 kN 时,钢管表面铁屑开始发生脱落,构件已达极限荷载.随后,试件变形加剧,荷载下降较快.当荷载降至 1 840 kN 时,图 3(a)中鼓曲面 1 发生轻微的鼓曲变形,管内发出响亮的“啪啪”声,表明柱内核心混凝土已被压碎.荷载下降至 1 740 kN 时,截面 1、2 处钢管均出现严重凸起变形并向着附近截面发展.试件整体呈现剪切破坏形式.

对于含钢率 6.7% 的试件,以 K40-3A 为例,加载初期构件整体处于弹性阶段,未产生明显变形,加载至 1 979 kN 时,钢管外表面铁屑出现剥落,荷载达到极限荷载(2 061 kN)之后,开始进入下降段,降至 1 937 kN 时,鼓曲面 1 发生轻微的鼓曲(见图 3(b)),鼓曲面 2 也出现同样鼓曲,荷载继续下降后,鼓曲 3 钢管壁同样发生屈曲变形,同时鼓曲面 1、2 两处破坏面贯通,当荷载下降至 1 794 kN 时,鼓曲面 1、鼓曲面 2 与鼓曲面 3 形成剪切面,试验结束.

对于含钢率为 7.7% 的试件,以 K35-4A 为例,极限荷载为 1 929 kN;当荷载由开始加载至 1 803 kN 时,试件外形未产生任何变化,荷载到达 1 803 kN 时,钢管外侧铁屑开始掉落;当荷载到达极限承载力后开始下降,降至 1 823 kN 时,柱中部鼓曲面 1 发生轻微鼓曲,荷载持续下降,鼓曲面 1 处鼓曲继续增大,鼓曲面 2、4 钢管亦发生屈曲,同时混凝土发出“啪啪”声;当荷载下降至 1 772 kN 时,鼓曲面 1、2 变形严重并贯穿一体,鼓曲面 4 变形进一步加大,且鼓曲面 3 出现轻微屈曲变形(见图 3(c)).荷载稳定后鼓曲面 3、4 形成斜向的剪切面.

从试件破坏形态可知,随着含钢率的变化,内填大块体矿渣柱承载力变化不明显.但随含钢率的增加,剪切滑移线逐渐由柱中部往柱下端发展,分析可知随着钢管壁厚的增大,钢管对柱中混凝土的约束作用加大,柱底部混凝土亦产生过度压缩导致剪切滑移线下降.表明含钢率的增加虽然对构件极限承载力的影响不大,却一定程度上改变了剪切滑移线的位置.同时加载过程中所有焊缝均协同工作良好,并未出现拉裂现象,构件整体工作性能较好.

2.2 荷载轴向变形关系曲线

不同强度混凝土下薄壁钢管混凝土内填大块体矿渣柱的荷载轴向变形关系曲线如图 4 所示.从图中可以看出,试件的破坏均经历了弹性、弹塑性和塑性 3 个阶段.加载前期曲线斜率大体相同,短柱处于弹性工作阶段,表明各构件具有相近的初始刚度.当核心混凝土强度由 C30 增加到 C40 后,各组混合构件的平均极限承载力提高约 29%,而当混凝土强度等级由 C40 增大到 C45 后,构件平均极限承载力提高约 8%.表明随着矿渣混凝土强度的增强,短柱的轴压承载力随之加大.分析图可知,构件极限荷载随截面含钢率的增大呈增大趋势,但随矿渣块体替代率的变化未显出明显规律.混凝土强度等级为 C30、C40 和 C45 时,当截面含钢率由 5.7% 增加到 7.7% 时,极限荷载分别提高 24.5%、15.3% 和 20.4%,说明含钢率的增加对构件极限荷载的提高较为显著.分析图 4(a),含钢率同为 5.7% 的 K30-1A 和 K30-2A,矿渣替代率由 0 增加到 10% 时,极限承载力降低约 11.76%;图 4(b)中含钢率为 6.7% 的 K35-1B 和 K35-2B,矿渣块体替代率为 0、10% 时的极限承载力降低 4.7%;同理图 4(c)中含钢率同为 7.7% 的轴压短柱 K40-1C 和 K40-2C 相比,承载力降低 1.8%.可见矿渣大块体替代率对短柱极限承载力的影响很小,且随着含钢率的增加替代率的影响减弱,表明大块体矿渣能够较好地替代管内核心混凝土.

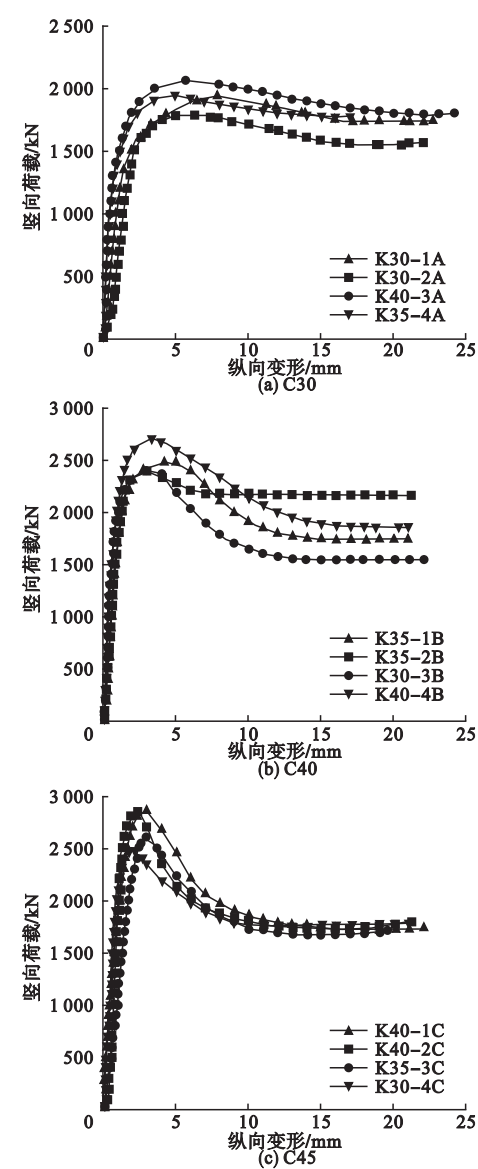


图4 荷载-轴向变形关系曲线

Fig. 4 The relations of axial force and deformation

2.3 荷载-应变关系曲线

试件中部钢管柱外壁荷载应变关系曲线见图5。从图中可以看出,初始阶段各构件曲线大体为直线,短柱处于弹性工作状态。此时钢管与混凝土基本各自独立工作,钢管对混凝土的约束作用较小。伴随荷载增加,管内混凝土受力后内部微裂缝开展,钢管与混凝土发生内力重分布,钢管承受压力比例逐步增长,从而产生柱的纵向变形。同时混凝土由于变形系数增加较快,而导致其水平膨胀挤压钢管产生变形。由图可知,柱横向应变曲线斜

率大于纵向应变,表明在受力过程中,钢管较为稳定,核心混凝土对柱整体变形的影响较大。当荷载增加至极限荷载的75%时,伴随荷载的增大,对应的纵横向应变增长较快,曲线出现明显拐点。对比不同强度曲线图可以发现,核心混凝土为C30时,曲线未出现明显的下降段;混凝土强度等级为C45时,当柱达到极限荷载后随着变形的增加承载力急剧下降。表明C30矿渣混凝土柱相比于C40和C45柱具有较好的延性。

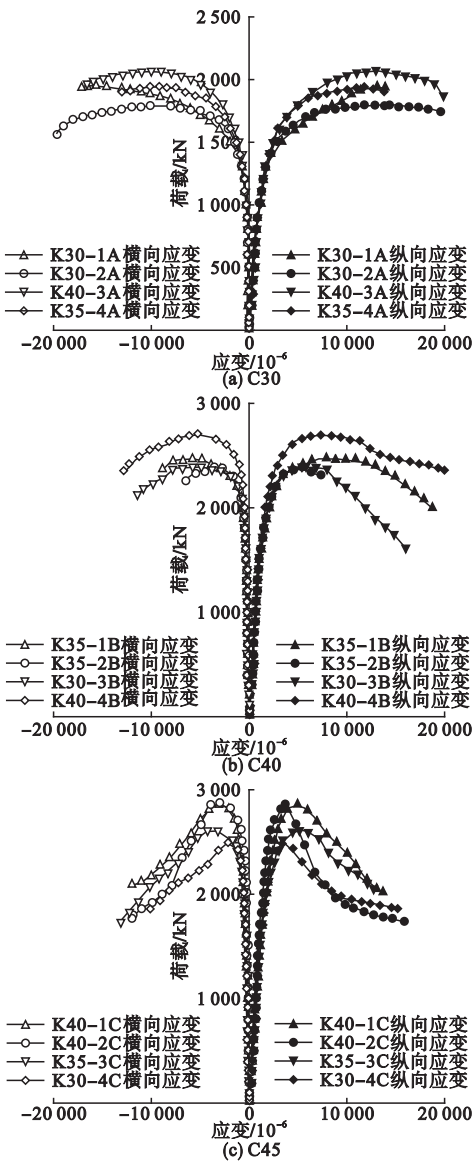


图5 荷载-应变关系曲线

Fig. 5 The relationships of load and strain

3 轴压承载力计算

3.1 已有规范计算结果与实测值的比较

目前,对于钢管混凝土短柱的轴压承载力计算方法,有英国的 BS5400(1979) 规程、欧洲 EC4(2004)、日本的 AIJ(1997) 规程以及美国的 ACI(1999) 规程等都有涉及. 我国关于钢管混凝土轴压承载力计算相关规定主要有《钢管混凝土结构技术规范》(GB50936—2014) 以及 DJB(2003) 规程. 为考察现有钢管混凝土计算规范对矿渣短柱极限承载力的适用性,笔者给出 7 个不同规程对 9 个轴压短柱的极限承载力计算值与实测值的比值.

3.2 承载力计算公式

各国规范对内填大块体矿渣型的薄壁钢管混凝土轴压短柱承载力计算并没有做出明确的规定;笔者通过分析已有公式,运用叠加原理方法提出新的薄壁钢管混凝土内填大块体矿渣柱轴压短柱计算公式:

$$N_u = k_s \cdot A_s \cdot f_y + k_c \cdot f_{cn} \cdot A_c \tag{1}$$

式中: k_s 取 1; k_c 为材料的分项系数; f_y 为钢材实测的屈服强度; f_{cn} 为核心混凝土的轴心抗压强度; A_s 、 A_c 分别为钢管、混凝土的截面面积.

套箍系数也称约束效应系数,用以反映钢管混凝土截面的钢材和核心混凝土的几何

特征和物理特征的影响. 其值越大,钢材所占比重越大;反之,则混凝土所占比重越大. 图 6 为构件材料分项系数 k_c 与套箍系数 ξ 的关系散点图.

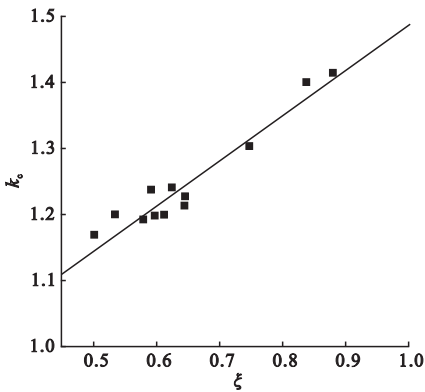


图 6 $k_c - \xi$ 关系曲线

Fig. 6 The relationships of $k_c - \xi$

通过 MATLAB 数值分析对二者进行数拟合,得到 k_c 与 ξ 的线性回归公式:

$$k_c = 0.690\xi + 0.797 \tag{2}$$

将式(2)代入式(1),得到的短柱承载力计算式:

$$N_u = A_s \cdot f_y + (0.690\xi + 0.797) \cdot f_{cn} \cdot A_c \tag{3}$$

将此公式计算结果与试验值比较,结果见表 4. 可以发现,与其他规范相比,采用式(3)计算结果与试验吻合较好,可以作为薄壁钢管混凝土内填大块体矿渣柱的设计公式.

表 4 计算结果与试验结果对比

Table 4 Comparison of calculated and measured results

编号	承载力计算值/承载力试验值						
	ACI (1999)	AIJ (1997)	BS5400 (1979)	EC4 (2004)	DBJ (2003)	GB50936 (2014)	式(3)
30-1-A	0.790	0.850	1.000	0.870	1.054	1.130	1.035
30-2-A	0.838	0.895	1.062	0.918	1.098	1.190	1.091
40-3-A	0.801	0.851	1.070	0.871	1.048	1.184	1.090
35-4-A	0.811	0.882	1.122	0.885	1.055	1.192	1.097
35-1-B	0.748	0.805	1.070	0.822	1.022	1.080	0.989
35-2-B	0.763	0.825	1.057	0.842	1.023	1.090	0.990
30-3-B	0.739	0.745	0.977	0.770	0.935	0.977	0.891
40-4-B	0.723	0.660	0.990	0.736	0.933	0.998	0.887
40-1-C	0.714	0.749	0.996	0.785	0.978	1.018	0.928
40-2-C	0.701	0.733	0.992	0.765	0.940	0.990	0.900
K35-3-C	0.730	0.789	1.038	0.805	0.985	1.036	0.939
K30-4-C	0.702	0.750	0.970	0.788	0.950	0.978	0.887

4 结 论

(1)薄壁钢管混凝土内填大块体矿渣短柱破坏过程均经历弹性、弹塑性和塑性三个阶段,各试件初始刚度相近,且均发生剪切破坏。随着含钢率的增大,短柱破坏时的剪切滑移线逐渐下移。核心混凝土为 C30 的矿渣短柱荷载位移关系曲线没有明显的下降段,随着核心混凝土强度的增加,构件达到极限荷载之后,曲线的下降段斜率随之显著增大。表明核心混凝土强度越小,柱延性越好。由荷载应变曲线可知,矿渣短柱的横向应变速度较纵向变形较快,表明与外包钢管相比,管内混凝土的性质对柱整体变形的影响较大。

(2)矿渣柱的极限承载力对各参数变量的敏感程度依次为核心混凝土强度、含钢率和块体替代率。一定范围内,核心混凝土强度越强,含钢率和替代率越高,柱的承载力越大。大块体矿渣能较好地替代矿渣混凝土作为短柱的内填材料,在替代率为 0~20% 时,随着大块体矿渣取代率的增加,柱的极限荷载增长不明显,故设计时可不予考虑。

(3)笔者提出的大块体矿渣薄壁钢管混凝土短柱计算公式,经验证与试验结果吻合较好,可在实际工程中作为设计参考。

参考文献

[1] 程福安,魏瑞丽,李辉.粒化高炉矿渣资源化利用的技术现状[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2010(3):446-450.
(CHENG Fuan, WEI Ruili, LI Hui. Status of recycling technology of blast furnace slag[J]. Journal of Xi'an university architecture and technology (natural science edition), 2010, (3):446-450.)

[2] 张国忠,李广军,司有宝.浅析高炉矿渣的综合应用[J].价值工程,2014,15(29):145-146.
(ZHANG Guozhong, LI Guangjun, SI Youbao. On the comprehensive utilization of blast furnace slag[J]. Value engineering, 2014, 15

(29):145-146.)

[3] 王志滨,陶忠.带肋薄壁方钢管混凝土偏压构件力学性能研究[J].工业建筑,2009,39(4):1-4.
(WANG Zhibin, TAO Zhong. Behavior of concrete-filled square stiffened thin-walled steel tubular beam-columns[J]. Industrial construction, 2009, 39(4):1-4.)

[4] CLOTILDA P, HANIZAH A H, et al. Experimental behaviour of concrete filled thin walled steel tubes with tab stiffeners[J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(7):915-922.

[5] WANG Haichao, GE Yuezheng, LI Peikui. The study on ductility of thin-walled square concrete-filled steel tubular short columns configured with binding rebars[J]. Applied mechanics and materials, 2011, 94/95/96:1601-1606.

[6] 杨俊.薄壁方钢管-再生混凝土短柱的轴压力学性能研究[D].厦门:华侨大学,2012.
(YANG Jun. Study on the behavior of recycled aggregate concrete columns under static loading[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2012.)

[7] WANG Jingfeng, CHEN Xinyi, HOU Hetao. Experimental study of blind bolted joints to concrete-filled thin-walled steel tubular columns under cyclic loading[J]. Applied mechanics and materials, 2012, 166/167/168/169:78-82.

[8] ZHANG Xuepeng. Stability bearing capacity of concrete filled thin-walled circular steel tubular column under axial compression[J]. Advanced materials research, 2013, 690/691/692/693:720-723.

[9] 吴波,张金锁,赵新宇.薄壁方钢管再生混合短柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(9):30-37.
(WU Bo, ZHANG Jinsuo, ZHAO Xinyu. Tests on axial behavior of stub square thin-walled steel tubular columns filled with demolished concrete blocks[J]. Journal of building structures, 2012, 33(9):30-37.)

[10] 吴波,赵新宇,张金锁.薄壁圆钢管再生混合中长柱的轴压与偏压试验研究[J].土木工程学报,2012(5):65-77.

- (WU Bo,ZHAO Xinyu,ZHANG Jinsuo. Tests on slender circular thin-walled steel tubular columns filled with demolished concrete lumps under concentrically eccentrically compressive loadings[J]. China civil engineering journal, 2012(5):65-77.)
- [11] XU Jianfeng, WU Peng, ZHAO Junhai, et al. Unified solution of the ultimate bearing capacity for stiffened and thin-walled square CFST short columns under axial compression[J]. Advanced materials research, 2013, 690/691/692/693:797-804.
- [12] GALVÍN A P, AGRELA F, AYUSO J, et al. Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete[J]. Waste manage, 2014, 34(9):1698-7004.
- [13] 闻洋,梁东旭,王锋. 薄壁圆钢管再生混凝土混合中长柱轴压力学性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(3):437-443.
- (WEN Yang, LIANG Dongxu, WANG Feng. Mechanical performance of recycled concrete-filled circular steel tubular middle long columns under axial compression[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2016, 32(3):437-443.)
- [14] ZHAO Xinyu, WU Bo, WANG Long. Structural response of thin-walled circular steel tubular columns filled with demolished concrete lumps and fresh concrete[J]. Construction and building materials, 2016, 129:216-242.
- [15] MAHGUB M, ASHOUR A, LAM D, et al. Tests of self-compacting concrete filled elliptical steel tube columns[J]. Thin-walled structures, 2017, 110(C):27-34.
- [16] 郑克仁,孙伟,贾艳涛,等. 水泥-矿渣-粉煤灰体系中矿渣和粉煤灰反应程度测定方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(3):361-365.
- (ZHENG Keren, SUN Wei, JIA Yantao, et al. Method to determine reaction degrees of constituents in hydrating ternary blends composed of BFS, FA and Portland cement[J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2004, 34(3):361-365.)
- [17] 赵庆新,孙伟,缪昌文,等. 磨细矿渣掺量对混凝土徐变性能的影响及其机理(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(10):1760-1766.
- (ZHAO Qingxin, SUN Wei, MIAO Changwen, et al. Effect of ground granulated blast-furnace slag proportion on creep characteristics of concrete[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2009, 37(10):1760-1766.)
- [18] 郑捷,卞成辉. 日本开发利用混凝土细骨料的现状综述[J]. 商品混凝土, 2014(3):27-29, 67.
- (ZHENG Jie, BIAN Chenghui. A review of the present situation of development and utilization of concrete fine aggregate in Japan[J]. Eady-mixed concrete, 2014(3):27-29, 67.)
- [19] 郭兰慧,李然,范峰,等. 钢管混凝土框架-钢板剪力墙结构滞回性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11):69-78.
- (GUO Lanhui, LI Ran, FAN Feng, et al. Study on hysteretic behaviors of composite frame-steel plate shear wall structures[J]. China civil engineering journal, 2012, 45(11):69-78.)
- [20] 聂建国,樊健生,黄远,等. 钢板剪力墙的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9):1-8.
- (NIE Jianguo, FAN Jiansheng, HUANG Yuan, et al. Experimental research on steel plate shear wall[J]. Journal of building structures, 2010, 31(9):1-8.)