

自密实再生块体混凝土叠合剪力墙抗震性能试验研究

熊焱¹, 赵国伟¹, 吴迪², 肖茁良¹, 陈雅欣¹

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东广州 510640;

2. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东广州 510405)

摘要: 为了对再生块体混凝土叠合剪力墙的安全性鉴定和抗震加固提供参考, 通过1片预制普通混凝土墙板内现浇自密实混凝土叠合剪力墙和3片预制普通混凝土墙板内现浇自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的低周反复荷载试验, 研究了不同废旧混凝土块体取代率、轴压比和边缘约束构件钢管厚度对剪力墙抗震性能的影响, 对比分析了各剪力墙的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化及耗能能力。研究表明: 预制墙板自密实再生块体混凝土叠合剪力墙与预制墙板自密实混凝土叠合剪力墙均具有较好的抗震性能; 两侧预制墙板之间虽然没有设置格构式钢筋, 但通过预制墙板内侧界面锯齿状处理方式以及端部钢管混凝土构件的约束, 使预制和现浇的叠合墙体能整体协同受力; 自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的承载能力与自密实混凝土叠合剪力墙的相当; 废旧混凝土的掺入对叠合墙体初始刚度、水平承载力、骨架曲线、耗能能力、刚度、破坏位移角和延性的影响不大; 在试验参数范围内, 钢管厚度和轴压比在一定范围内的增加, 有利于改善叠合墙体承载力, 提高叠合墙体耗能能力。建立了钢管混凝土边缘约束自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的承载力计算式, 计算结果与实测结果吻合较好。

关键词: 叠合剪力墙; 自密实混凝土; 废旧混凝土块体; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号: TU375 TU317.1 **文献标志码:** A

Experimental study on seismic behavior of composite shear walls filled with demolished concrete lumps and self-compacting concrete

XIONG Yan¹, ZHAO Guowei¹, WU Di², XIAO Zhuoliang¹, CHEN Yaxin¹

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: To provide theoretical basis and technical support for safety appraisal and seismic strengthening of composite structure filled with demolished concrete lumps (DCLs), the seismic performance of one precast normal concrete (NC) composite shear wall infilling self-compacting concrete (SCC) and three precast NC composite shear walls infilling DCLs and SCC were studied under quasi-static tests. The influences of various parameters (mix ratio of demolished concrete, axial load ratio and steel tube thickness of end post) on the seismic behavior of specimens were investigated. The failure pattern, hysteretic loops, skeleton curves, stiffness degradation curves and energy dissipation of shear walls were analyzed and compared. The test results indicate the two types of composite shear walls have good seismic behavior. Although no lattice reinforcement is set between the two sides of precast walls, the precast and cast-in-place composite walls can cooperate with each other through the zigzag treatment of the inner interface of the precast walls and the constraint of the end concrete-filled steel tube. The carrying capacity of composite shear wall infilling DCLs and SCC is not lower than that of composite shear wall infilling SCC. The addition of DCLs has little effect on the initial lateral stiffness, lateral load carrying capacity, skeleton curve, energy dissipation capacity, stiffness, destructive drift ratio, and ductility of composite shear walls. In addition, the increase of steel tube thickness and axial load ratio in a certain range can improve the carrying capacity and energy dissipation capacity of shear walls within the test range. The equations for predicting the strength of the new DCLs and SCC filled tube-confined composite shear wall were proposed. The calculated strengths are in good agreement with the test results.

Keywords: composite shear wall; self-compacting concrete; demolished concrete lump; quasi-static test; seismic behavior

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703303), 国家自然科学基金项目(51878298, 51778160), 广东省现代土木工程技术重点实验室资助项目(2021B1212040003)。

作者简介: 熊焱, 出生于1978年, 女, 工学博士, 副教授, 主要从事建筑结构的耐久性、混凝土结构抗火研究。email: xyan@scut.edu.cn

通信作者: 吴迪, 出生于1978年, 男, 工学博士, 副研究员, 主要从事结构减隔震和计算仿真研究。email: 11795234@qq.com

收稿日期: 2020年7月

0 引言

废旧混凝土约占建筑垃圾的 50%, 未经处理的废旧混凝土直接进行堆放或者填埋, 不仅占用大量土地, 还会造成环境污染。因此, 合理利用废旧混凝土对于减少工业固体废弃物的排放、节约能源和资源、保护环境具有重要的意义。再生骨料混凝土再利用是一个重要发展方向, 国内外学者对再生骨料混凝土已进行了较多的研究, 并取得了一定成果^[1-5]。然而, 再生骨料混凝土处理过程繁琐, 在其配制过程中仍然需要耗费大量水、水泥和能源。为寻求一种更为合理的废弃构件回收利用策略, 吴波等^[6]提出了再生块体混凝土, 直接将大尺度废旧混凝土块体或节段用于新建工程中, 并对再生块体混凝土的单轴受压性能开展了试验研究, 分析了废旧混凝土混合比和试块尺寸等因素对再生混合混凝土抗压强度的影响^[7-10]。严华^[11]和吴波等^[12-14]对薄壁钢管再生混合短柱的研究成果表明, 薄壁钢管再生混合柱的受力过程、轴压承载力、徐变性能与普通混凝土柱相似。吴波等^[15-18]还对再生混合柱、再生混合柱-钢筋混凝土梁节点和再生混合墙进行了抗震试验研究, 成果表明再生混合构件的耗能能力较好, 具有良好的抗震性能。骆志成^[19]和吴波等^[20]对再生混合组合楼板的基本受力性能以及耐火性能的研究成果表明, 对于有栓钉试件, 再生混合组合楼板的受弯承载力比现浇组合楼板稍高, 再生混合组合楼板具有与全现浇混凝土组合楼板基本相同的热工特性、高温变形行为和耐火性能。

叠合剪力墙结构体系是集构件设计标准化、制作工厂化和施工现场装配化为一体的建筑结构体系, 有利于工业化技术在建筑业的推进^[21]。叠合剪力墙是由两片预制钢筋混凝土板通过格构式钢筋相连接的中间带有空腔的墙体, 在施工中预制墙体作为浇筑混凝土的模板, 通过浇筑混凝土使预制墙板叠合在一起成为受力构件^[22]。有研究表明^[23], 预制叠合板式混凝土剪力墙的叠合面有足够的抗剪强度, 用其代替现浇钢筋混凝土剪力墙是可行的。为使叠合剪力墙结构体系在我国地震频发区域进行推广和应用, 近年来我国学者在叠合墙抗震性能方面开展了大量的试验研究。如王滋军等^[22]、连星等^[24]、张伟林等^[25]研究了叠合板式混凝土剪力墙的抗震性能, 发现叠合板式剪力墙与全现浇剪力墙的受力过程、破坏模式相似, 各抗震指标如滞回曲线、骨架曲线等也相近; 王滋军等^[26]和程积润^[27]研究了带约束边缘构件的叠合剪力墙的抗震性能, 试验结果表明带约束边缘构件的叠合剪力墙整体性、耗能

能力较好, 具有较好的抗震性能; 张文莹等^[28]、吴曦等^[29]、董格等^[30]研究了叠合剪力墙连接节点的抗震性能, 发现对预制墙体纵向钢筋形成有效约束可提高预制剪力墙的抗震性能。

综上, 目前关于叠合剪力墙结构的研究多集中于钢筋混凝土边缘约束叠合剪力墙, 关于钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙的研究较少, 且将废旧混凝土块体技术应用于叠合剪力墙中也鲜有研究。本文中将钢管混凝土边缘约束构件、自密实混凝土和废旧混凝土块体三者结合, 设计一种钢管混凝土边缘约束自密实再生块体混凝土叠合剪力墙。该类剪力墙的优势在于: 1) 便于大尺度废旧混凝土块体投放, 端部钢管和两侧预制墙板合围, 中间形成空腔; 2) 空腔和钢管内新浇筑的混凝土采用自密实混凝土, 可提高再生块体混凝土的施工效率, 避免叠合剪力墙空腔浇筑再生块体混凝土时振捣带来的问题; 3) 预制墙板内侧界面采用锯齿状处理方式, 预制墙板内横向钢筋伸入端部钢管内, 使现浇部分与预制部分更好地形成一整体, 协同受力。

为研究上述剪力墙的抗震性能, 本文作者通过对 1 片自密实混凝土叠合剪力墙试件和 3 片自密实再生块体混凝土叠合剪力墙试件进行低周反复荷载试验, 研究废旧混凝土块体取代率、轴压比和边缘约束构件的钢管厚度对试件抗震性能的影响, 对比分析试件的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化及耗能能力, 以期对再生块体混凝土叠合结构的设计及工程应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验中设计了 4 片方钢管混凝土柱边缘约束的叠合剪力墙试件, 研究变量为废旧混凝土块体取代率(试件所含废旧混凝土质量与除加载梁和基础梁外所有混凝土的质量之比)、边缘约束构件钢管厚度及轴压比。试件设计参数见表 1。其中, 轴压比 n 按下式^[27]计算:

$$n = N/N_0 \tag{1}$$

$$N_0 = f_{c1}A_{c1} + f_{c2}A_{c2} + f_yA_s \tag{2}$$

表 1 试件设计参数
Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	t/mm	$\eta/\%$	n	与试件 W0 的差别
W0	1	20	0.15	—
N1	1	0	0.15	块体取代率
W1	2	20	0.15	方钢管厚度
W2	1	20	0.25	轴压比

注: t 为方钢管厚度; η 为废旧混凝土取代率; n 为轴压比。

式中, N 为竖向荷载, A_{cl} 和 f_{cl} 分别为预制混凝土的横截面面积和轴心抗压强度, A_{c2} 和 f_{c2} 分别为现浇混凝土的横截面面积和轴心抗压强度, A_s 和 f_y 分别为方钢管的截面面积和屈服强度。

试件墙宽和墙厚分别为 1 200 mm 和 200 mm。剪力墙两端的竖向边缘约束构件为边长 200 mm 的薄壁方钢管柱, 钢管柱由薄钢板加工而成, 内填自密实再生块体混凝土。方钢管的名义厚度包括两种, 分别为 1 mm 和 2 mm (实测厚度分别为 0.96 mm 和 2.00 mm)。将方钢管与预制混凝土墙板的接触面预先开槽, 开槽大小和数量由预制混凝土墙板内横向钢筋的数量和直径决定。两侧预制混凝土墙板内横向钢筋的两端均伸入端部方钢管预留槽洞中; 预制墙板内上下两端的第一根横向钢筋采用直螺纹钢筋, 伸入钢管后用螺帽扭紧; 其余横向钢筋为普通钢筋, 伸入钢管长度为 200 mm。试件尺寸及构造如图 1 所示。

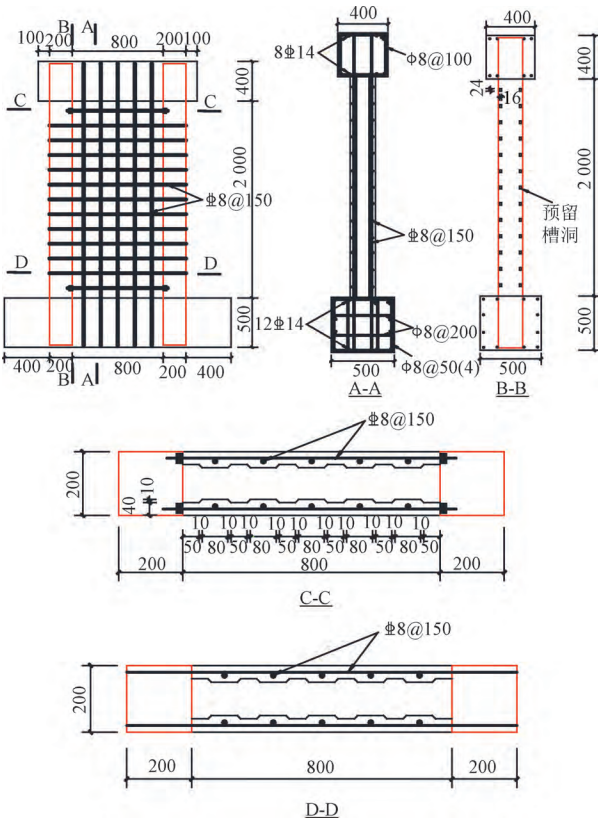


图 1 试件尺寸及构造

Fig. 1 Dimensions and details of specimen

试件浇筑工艺步骤如下: 1) 采用普通混凝土浇筑预制墙板。2) 待预制墙板养护完成后, 首先将两预制墙板内横向钢筋两端分别插入端部方钢管预留的槽洞中, 将预制墙板上下两端的第一根横向钢筋伸入钢管后用螺帽扭紧, 其余横向钢筋全部伸

入方钢管内, 将预制墙片中竖向钢筋和方钢管插入底梁钢筋笼内, 然后浇筑基础梁。3) 预制墙板空腔和方钢管内混凝土以及加载梁混凝土浇筑前 1 h, 通过喷洒自来水的方式充分润湿废旧混凝土块体; 正式浇筑时, 首先在预制墙板空腔和方钢管内灌入约 20 mm 厚的自密实新混凝土, 然后将废旧混凝土块体和自密实新混凝土交替置入预制墙板空腔和方钢管内, 并采用振捣棒给予短时间的辅助振捣^[31], 最后采用现浇自密实混凝土浇筑加载梁。浇筑过程如图 2 所示。



图 2 试件浇筑过程

Fig. 2 Concrete casting of specimen

1.2 材料性能

试验中采用粗骨料粒径不超过 16 mm 的商品自密实混凝土, 试验当天测得自密实混凝土立方体抗压强度 f_{cu2} 为 50.00 MPa。废旧混凝土破碎后的块体特征尺寸为 60 ~ 80 mm, 如图 3 所示。试验当天测得废旧混凝土芯样强度 f_{cu3} 为 51.12 MPa, 按照 CECS 03: 2007《钻芯法检测混凝土强度技术规程》^[32] 的规定, 可直接等值换算成标准立方体试块的抗压强度为 51.12 MPa。试验当天测得预制墙板混凝土的立方体抗压强度 f_{cu1} 为 51.14 MPa。

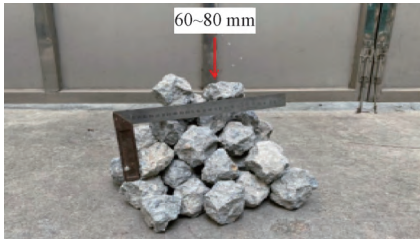


图 3 废旧混凝土块体

Fig. 3 Demolished concrete lumps (DCLs)

在本试验中,叠合剪力墙空腔和方钢管内的自密实再生块体混凝土的立方体抗压强度 f_{cu} 取自密实新混凝土和废旧混凝土的组合抗压强度^[7],即

$$f_{cu} = f_{cu2}(1 - \eta) + f_{cu3}\eta \tag{3}$$

依据 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》,还开展了自密实混凝土 T_{500} 、坍落扩展度和 J 环扩展试验,以测试其工作性能,测试结果见表 2。

表 2 自密实混凝土工作性能测试结果
Table 2 Test results of working performance of self-compacting concrete

T_{500}/s	坍落扩展度/mm	坍落扩展度等级	J 环扩展度/mm	PA/mm	PA 等级	J 环附近是否堵塞
1.4	685	SF2	645	40	PA1	否

注: T_{500} 为测定扩展度达到 500 mm 的时间;PA 为坍落扩展度与 J 环扩展度的差值。

试件采用 Q235B 级钢材,预制混凝土墙板中分布钢筋均采用直径为 8 mm 的 HRB400 钢筋。根据 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》对预留方钢管和钢筋试样进行拉伸试验,测得方钢管和钢筋的屈服强度和抗拉强度如表 3 所示。

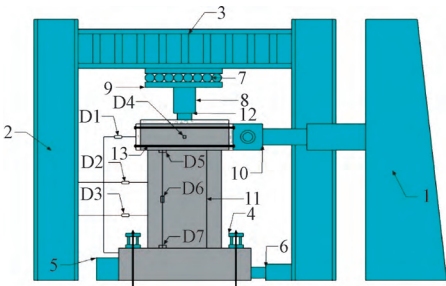
表 3 钢材和钢筋实测强度
Table 3 Strengths of steel plate and steel bar

钢材类型	厚度(直径)/mm		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
	名义值	实测值		
Q235B	1	0.96	204.8	321.2
	2	2.00	355.8	468.3
HRB400	8	8.00	460.6	624.3

1.3 加载装置及制度

试验在华南理工大学结构实验室进行,拟静力试验装置及测点布置如图 4a 所示。竖向荷载通过液压千斤顶施加到加载梁上,且在试验过程中维持恒定;水平方向通过 MTS 电液伺服作动器施加推拉反复荷载。加载现场如图 4b 所示。为防止试验过程中试件基础梁产生滑动和转动,将基础梁通过两侧的压梁和千斤顶完全固定,以达到固接效果。

试验时先对试件施加预定的竖向荷载,竖向千斤顶作用于剪力墙加载梁的中心,以保证荷载通过加载梁均匀地传递到剪力墙上。然后在保持竖向荷载基本稳定的情况下施加反复推、拉水平荷载。本次试验采用位移控制^[33-34]。定义位移角 $\theta = \Delta_{顶}/H$ ($\Delta_{顶}$ 为剪力墙顶部的位移, H 为基础梁顶到加载点的高度, $H = 2\ 200\text{ mm}$),试验采用九级加载,每级加载的位移角、位移值和循环次数见表 4。当试件水平荷载下降至峰值荷载的 85% 以下时,停止加载。当加载至第 9 级时,由于试件已经发生了很大的侧向位移,为确保试验安全,仅循环了 1 次。



注: 1.反力墙; 2.反力架; 3.横梁; 4.压梁; 5.地梁; 6.千斤顶; 7.滚轴; 8.竖向千斤顶; 9.钢板垫; 10.MTS 作动器; 11.试件; 12.压力传感器; 13.拉杆。
(a) 试验装置示意及测点布置



(b) 加载现场

图 4 试验装置

Fig. 4 Test setup

表 4 加载制度
Table 4 Loading protocol

加载级	位移角 θ	位移 Δ /mm	循环次数
1	1/1000	2.20	1
2	1/800	2.75	1
3	1/500	4.40	3
4	1/300	7.33	3
5	1/200	11.00	3
6	1/100	22.00	3
7	1/75	29.30	3
8	1/50	44.00	3
9	1/30	73.30	1

加载梁的水平位移通过位移传感器 D1 测量,该传感器通过立杆固定于基础梁上,可与 MTS 电液伺服作动器内部力传感器实现同步采集。在剪力墙三分点处布置位移计 D2、D3。在加载梁上布置位移计 D4,位移计方向垂直于剪力墙平面,以监测加载过程中剪力墙发生的平面外位移。同时在边缘约束钢管和预制墙片交接处布置位移计 D5、D6 和 D7,以量测预制墙片和方钢管发生的相对位移(水平向位移计监测方钢管和预制墙片发生的张开位移,垂直向位移计监测方钢管和预制墙片发生的错动位移)。为监测方钢管应变的变化情况,在剪力墙两侧方钢管的外侧面各粘贴 2 个应变片。所有的位移计和应变片都接入位移应变采集箱,采样频率设置为 1Hz,以实现位移应变信号的自动采集。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及破坏形态

试验过程中4片叠合剪力墙试件表现出大致相同的破坏过程和破坏特征,以试件W0为例进行介绍。试件W0破坏过程及现象如图5所示。具体为:

1) 当处于弹性加载阶段(第1级和第2级加载)时,钢管没有发生肉眼可见的鼓凸现象,预制混凝土墙板也没有产生肉眼可见的裂缝。

2) 第3级加载时,在预制墙板靠近钢管的一侧,距离基础梁顶640 mm高度处,开始产生第1条裂缝。

3) 第4级加载时,剪力墙左右两侧钢管受压,基

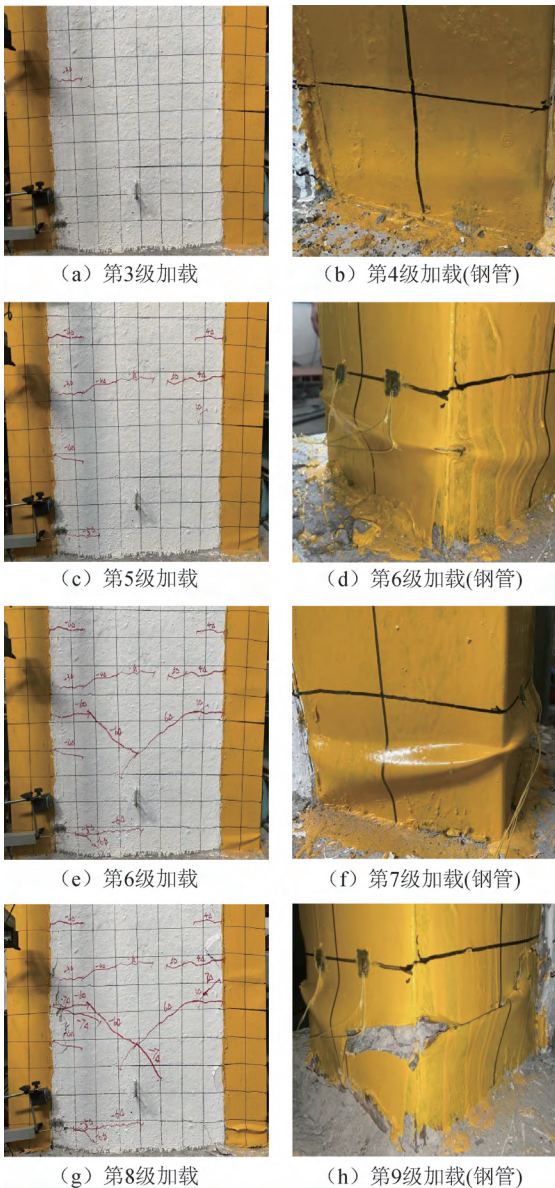


图5 试件W0破坏过程及现象

Fig.5 Failure processes and modes of specimen W0

础梁顶的上方发生微微鼓凸,但反向加载时鼓凸又被拉平,同时预制混凝土墙板裂缝增多。

4) 第5级加载时,钢管的鼓凸现象较上一级加载明显,同时裂缝进一步增多并开始延伸。

5) 第6级加载时,钢管的鼓凸现象加剧,在钢管上距离基础梁顶60 mm高度处发现一道破裂的小口,同时预制混凝土墙板表面形成两条相交的斜裂缝。

6) 第7级和第8级加载时,可以听到混凝土撕裂的声音,裂缝进一步加宽延伸,预制墙板表面形成两道X形主斜裂缝,同时钢管鼓凸严重,形成水平的断裂面。

7) 第9级加载时,试件侧向变形严重,预制墙板表面的混凝土脱落,露出被压弯的钢筋,同时靠近基础梁顶钢管内的混凝土被压碎,且钢管在距离基础梁顶40 mm处产生一条断裂的通缝。

当叠合剪力墙处于弹性工作阶段时,试件的边缘约束方钢管未发生屈曲,其水平荷载-位移曲线呈线性变化;当叠合剪力墙进入屈曲后工作阶段时,试件的边缘约束方钢管发生屈曲,且随着加载位移幅值的增大,方钢管屈曲逐渐加剧,鼓凸高度逐渐增大,预制混凝土墙板表面出现裂缝并逐渐发展延伸;随着位移幅值的继续增大,试件进入破坏阶段,方钢管出现局部破裂,预制混凝土墙板表面形成“X”形主斜裂缝;剪力墙破坏后,试件W0和试件N1在与方钢管交接处的预制混凝土墙板角部发生了混凝土剥落现象,而试件W1、W2在与方钢管交接处的预制混凝土墙板均存在混凝土剥落现象,在墙板角部剥落尤为明显,这是由于试件W1和试件W2的方钢管厚度和试验轴压比较大,水平承载力较大的缘故。各试件破坏形态如图6所示。

2.2 滞回曲线

4片叠合剪力墙的水平荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线如图7所示,从图中可以看出:

1) 当加载位移幅值较小时,叠合剪力墙的边缘约束方钢管未发生屈曲且混凝土墙板未产生裂缝,试件无残余变形,滞回曲线表现为直线;随着加载位移幅值的增大,叠合剪力墙的边缘约束方钢管发生屈曲且混凝土墙板产生裂缝,表现为滞回曲线向水平轴倾斜;随着加载位移幅值的进一步增大,叠合剪力墙的边缘约束方钢管发生破坏且预制混凝土墙板裂缝无法闭合,墙体出现残余变形,滞回曲线出现中部轻微“捏拢”现象。

2) 试件W0和试件N1的滞回曲线形状基本相似,且峰值荷载也相差很小,可知当废旧混凝土的抗压强度(51.12 MPa)与自密实新混凝土的抗压强度(50.00 MPa)相差不大时,废旧混凝土块体取代率为

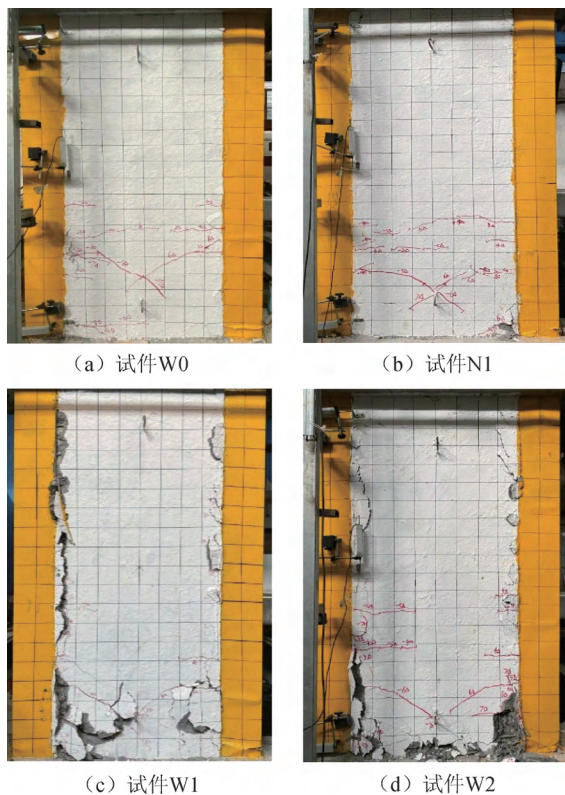


图 6 试件破坏形态
Fig. 6 Failure modes of specimens

20% 的自密实再生块体混凝土叠合剪力墙与未掺入废旧混凝土块体的自密实混凝土叠合剪力墙的抗震性能相差不大。

3) 试件 W0 与试件 W1 相比,前者的峰值荷载较后者约降低了 104 kN,一方面是由于前者边缘约束方钢管的厚度较后者小,另一方面是由于试验中所采用的不同厚度的边缘约束方钢管虽然标号 (Q235B) 相同,但后者的屈服强度和抗拉强度都较前者大。试验结果表明,当剪力墙边缘约束方钢管的厚度仅为 0.96 mm 时,其滞回性能和变形能力仍然较为稳定。

4) 试件 W0 与试件 W2 相比,由于试件 W0 的轴压比较试件 W2 小,所以其屈服位移和峰值荷载所对应的位移均较大。

2.3 骨架曲线

4 个试件的水平荷载-位移骨架曲线如图 8 所示。试件的屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y (根据等能量法在骨架曲线上确定)、峰值荷载 P_m (最大水平荷载) 和对应的峰值位移 Δ_m 、破坏位移 Δ_u (水平荷载下降到峰值荷载的 85% 时对应的位移值)、破坏位移角 θ_p ($\theta_p = \Delta_u/H$, 其中 H 取墙高与加载梁的半高之和,为 2 200 mm) 和位移延性系数 μ ($\mu = \Delta_u/\Delta_y$) 见表 5。从图 8 和表 5 可以看出:

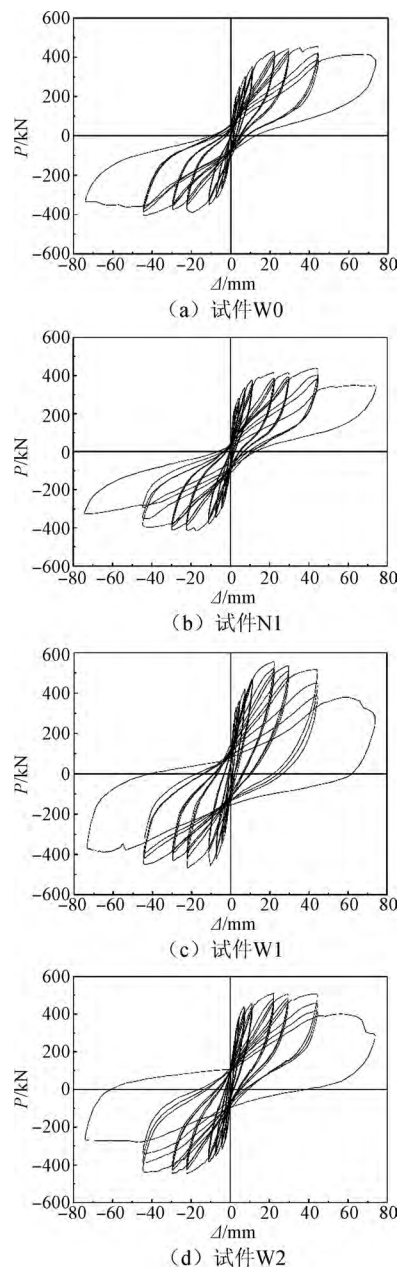


图 7 试件滞回曲线
Fig. 7 Hysteretic curves of specimens

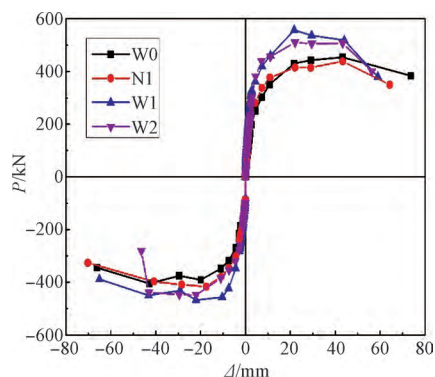


图 8 试件骨架曲线
Fig. 8 Skeleton curves of specimens

表 5 主要试验结果
Table 5 Main test results

试件 编号	P_y / kN	Δ_y / mm	P_m / kN	Δ_m / mm	Δ_u / mm	μ	θ_p
W0	344.09	11.18	453.54	43.25	66.10	5.91	1/33
N1	372.68	11.75	438.30	43.30	64.31	5.47	1/34
W1	440.12	9.97	557.26	21.76	59.00	5.91	1/37
W2	438.25	8.59	510.13	22.08	46.43	5.40	1/47

1) 试验加载初期,试件 W0、N1、W1、W2 处于弹性阶段时,骨架曲线走势基本相同,呈直线变化趋势;峰值荷载后,曲线下降平缓,延性较好。

2) 自密实再生块体混凝土叠合剪力墙破坏位移角均达到 1/50 以上,满足 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[35] 中的要求(需达到 1/120)。

3) 自密实再生块体混凝土叠合剪力墙位移延性系数为 5.40~5.91,表明墙体屈服后变能力强,延性较好。

4) 试件 W0 和试件 N1 相比,试件的骨架曲线和初始刚度基本相同,且峰值荷载、破坏位移角和位移延性系数的变化均在 10% 以内,这表明废旧混凝土块体的掺入对自密实再生块体混凝土叠合剪力墙试件上述指标的影响较小。

5) 试件 W0 和试件 W1 相比,试件 W1 边缘约束方钢管的厚度虽然是试件 W0 的 2.08 倍,但两者位移延性系数相等,试件 W1 的峰值荷载仅比试件 W0 升高 22.86%,而破坏位移角却较试件 W0 降低了 10.80%,这主要是因为试件 W1 边缘约束方钢管的承载能力较试件 W0 高,一旦方钢管发生破坏而产生断裂通缝,由钢管所承担的荷载会瞬间转移到混凝土墙体,从而使得墙体立刻产生破坏,因此试件 W1 的破坏位移较试件 W0 小。试验结果表明,在叠合剪力墙厚度与方钢管厚度之比高达 208.33 的情况下,将自密实再生块体混凝土叠合剪力墙应用于抗震设防区也是完全可行的,其破坏位移角满足现行规范的要求。

6) 试件 W0 和试件 W2 相比,虽然试件 W2(轴压比 0.25)的位移延性系数与试件 W0(轴压比 0.15)基本相当,且试件 W2 的峰值荷载仅较试件 W0 提高了 12.48%,但试件 W2 的破坏位移角却比试件 W0 降低了 29.78%。这表明轴压比的增加对自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的抗震性能有显著影响。

2.4 耗能能力

试件的耗能能力取各试件荷载-位移滞回曲线同级加载时的第 1 循环进行绝对积分。各试件的耗能能力 E 曲线如图 9 所示。从图中可以看出:

1) 试件 W0、N1、W1 和试件 W2 的耗能能力呈

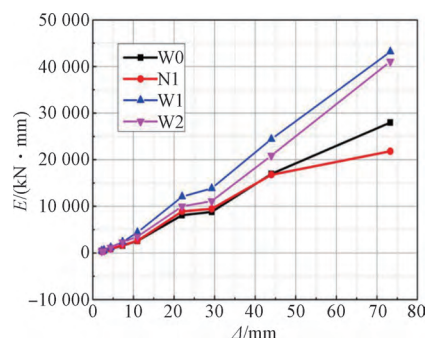


图 9 耗能能力随位移幅值的变化曲线

Fig. 9 Variation of energy dissipation capacity with displacement amplitude

现相同的变化趋势,随着位移幅值的增加,各试件的耗能能力越来越大。

2) 试件 W0 和试件 N1 在相同位移幅值下的耗能能力和增长趋势总体上较为接近,表明自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的耗能能力受废旧混凝土的影响不大。

3) 相同位移幅值下,试件 W0 的耗能能力较试件 W1 和试件 W2 小,说明方钢管厚度和轴压比的增大可以提高自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的耗能能力。

2.5 刚度退化

各试件割线刚度 K_t 随加载位移的退化曲线如图 10 所示。从图中可以看出:

1) 试件 W0、N1、W1 和试件 W2 的刚度退化呈现相同的变化趋势,随着位移幅值的增大,自密实再生块体叠合剪力墙试件的割线刚度逐渐降低。

2) 试件 W0 和试件 N1 的刚度在退化过程中基本上相等,而试件 W1 和试件 W2 的刚度在退化过程中始终大于试件 W0,说明废旧混凝土的掺入不会影响自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的刚度,而在一定范围内增大方钢管厚度和轴压比可以增大叠合剪力墙的刚度。

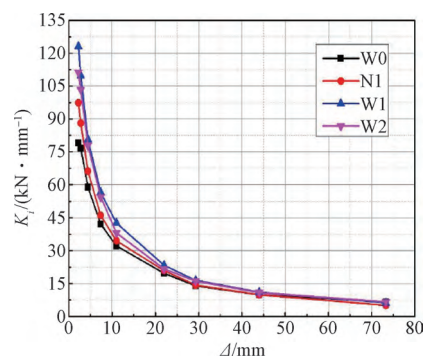


图 10 刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves

3 承载力计算

文献[27]中提出了钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙承载力的计算式,该计算方法对钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙的承载力计算具有较高的精度。但文献[27]中叠合剪力墙方钢管较厚且未开槽,对钢管内混凝土的约束作用较大,同时其高宽比(2.25)较大,而本试验中叠合剪力墙边缘约束方钢管很薄且进行了开槽处理,对钢管内混凝土的约束作用较弱,同时高宽比(1.67)较小。文献[27]中钢管内混凝土强度提高系数取值为1.2,为使文献[27]中的计算方法适用于本研究,有必要对其进行适当修正。由于本试验的钢管内侧进行了开槽处理,其对钢管内混凝土的约束比文献[27]的小,因此本文的钢管内混凝土强度提高系数取值修改为1.0。

参考文献[36]中的计算模型,同时考虑边缘约束方钢管进行了开槽处理,给出自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的计算简图如图11所示。图中 b_w 和 h_w 分别为横截面的厚度和长度; h_f 为受拉方钢管的边长; h'_f 为受压方钢管的边长; x 为横截面受压区高度,根据横截面轴向力平衡条件求得; N_{c1} 和 N_{c2} 分

别为钢管内混凝土和墙片混凝土所承担的力; N_{sw} 为墙片内纵向钢筋所承担的力; f_a 和 A_a 分别为受拉钢管的屈服强度和截面面积; f'_a 和 A'_a 分别为受压钢管的屈服强度和截面面积; N 为竖向荷载。

根据图11,钢管混凝土边缘约束自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的水平承载力可按式(4)~(9)进行计算。

$$P_{uc} = (Ne_0)/H \quad (4)$$

$$N = f'_a A'_a + N_{c1} + N_{c2} - f_a A_a - N_{sw} \quad (5)$$

$$N \left(e_0 - \frac{h_w}{2} + \frac{h'_f}{2} \right) = f_a A_a \left(h_w - \frac{h_f}{2} + \frac{h'_f}{2} \right) + N_{sw} \left(\frac{h_w - h'_f - h_f}{2} + \frac{3x}{4} \right) + N_{c2} \frac{x}{2} \quad (6)$$

$$N_{sw} = f_{yw} b_w \rho_w (h_w - 1.5x - h_f) \quad (7)$$

$$N_{c2} = f_c b_w (x - h'_f) \quad (8)$$

$$N_{c1} = f_c A_c \quad (9)$$

式中: e_0 为偏心距; f_{yw} 为墙体纵向钢筋屈服强度; ρ_w 为墙体纵向钢筋配筋率; f_c 为混凝土轴心抗压强度; P_{uc} 为试件的水平承载力; H 为试件基础梁顶至加载点的距离,本文取 $H=2\,200\text{ mm}$ 。

混凝土棱柱体抗压强度和立方体抗压强度之间的关系为 $f_c = \alpha_c f_{cu}$; α_c 为棱柱体抗压强度和立方体抗压强度之比,对于C50及以下普通混凝土取0.76,对高强混凝土C100取0.86,其间接线性内插法确定。因此,计算时,空腔与方钢管内混凝土的受压强度取根据 $f_c = 0.76 \times [f_{cu2} \times (1 - \eta) + f_{cu3} \times \eta]$ 计算的自密实再生块体混凝土的组合受压强度,其中 f_{cu2} 为50.00 MPa, f_{cu3} 为51.12 MPa, η 的取值如表1所示。而墙片混凝土的受压强度取空腔内混凝土的组合受压强度和预制墙板混凝土强度的平均值。

表6列出了计算得到的试件W0、N1、W1、W2的承载力,同时给出了计算值与试验值的比值。由表6可知,试件的水平承载力计算结果与试验结果较为接近,平均偏差为8.25%。产生这种偏差的原因是试验中加载点并非位于加载梁的中心,由此导致计算中使用的 H 值非实际值。故排除试验误差的影响,可以认为采用该计算式预测高宽比为1.67的自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的水平承载力具有较好的精度。

表6 承载力计算值与试验值比较

Table 6 Comparison of bearing capacity between calculated values and test values

试件编号	P_{uc}/kN	P_{uc}/kN	P_{uc}/P_{ue}
W0	453.54	439.08	0.96
N1	438.30	438.02	1.00
W1	557.26	644.45	1.16
W2	510.13	576.95	1.13

注: P_{uc} 和 P_{ue} 分别表示承载力的试验值和计算值。

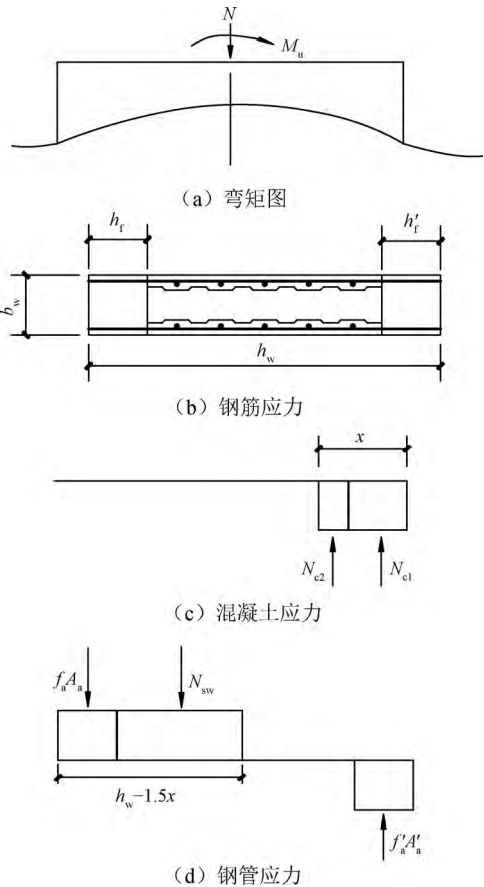


图11 承载力计算简图

Fig. 11 Computational model of bearing capacity

4 结论

1) 当废旧混凝土的抗压强度(51.12 MPa)与新混凝土的抗压强度(50.00 MPa)相差不大时,掺入废旧混凝土块体取代率为20%的自密实再生块体混凝土叠合剪力墙与未掺入废旧混凝土块体的自密实混凝土叠合剪力墙的抗震性能相当。废旧混凝土的掺入对自密实再生块体混凝土叠合剪力墙初始刚度、水平承载力、骨架曲线、破坏位移角和延性的影响较小。

2) 当剪力墙边缘约束方钢管的厚度仅为0.96 mm时,其滞回性能和变形能力仍然较为稳定。

3) 自密实再生块体混凝土叠合剪力墙位移延性系数变化范围为5.40~5.91,表明墙体屈服后具有良好的延性。

4) 在叠合剪力墙厚度与方钢管厚度之比高达208.33的情况下,将自密实再生块体混凝土叠合剪力墙应用于抗震设防区也是可行的,其破坏位移角满足现行规范的要求。

5) 当剪力墙的轴压比增加时,试验后的破坏位移角明显增大,表明轴压比的增加对自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的抗震性能有显著的影响。

6) 采用文中提出的承载力计算式可比较精确地预测高宽比为1.67的自密实再生块体混凝土叠合剪力墙的水平承载力。

参 考 文 献

- [1] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003(10): 17-20. (XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete-a review [J]. Concrete, 2003(10): 17-20. (in Chinese))
- [2] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview [J]. Materials and Structures, 2006, 39(6): 655-664.
- [3] TAVAKOLI M, SOROUSHIAN P. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(2): 182-190.
- [4] TOPÇU I B. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(12): 1817-1823.
- [5] LIMBACHIYA M C, LEELAWAT T, DHIR R K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete [J]. Materials and Structures, 2000, 33(9): 574-580.
- [6] 吴波, 刘琼祥, 刘伟, 等. 钢管再生混合构件初探[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(4): 120-124. (WU Bo, LIU Qiongxiang, LIU Wei, et al. Primary study on recycled concrete segment filled steel tubular members [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(4): 120-124. (in Chinese))
- [7] 张金锁. 薄壁方钢管再生混合柱的轴压和抗震性能试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011. (ZHANG Jinsuo. Experimental study on axial and seismic behaviors of square thin-walled steel tubular columns filled with demolished concrete lumps [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [8] WU B, ZHANG S Y, YANG Y. Compressive behaviors of cubes and cylinders made of normal-strength demolished concrete blocks and high-strength fresh concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 342-353.
- [9] WU B, LIU C H, YANG Y. Size effect on compressive behaviours of normal-strength concrete cubes made from demolished concrete blocks and fresh concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(19): 1155-1167.
- [10] WU B, LIU C H, WU Y. Compressive behaviors of cylindrical concrete specimens made of demolished concrete blocks and fresh concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 118-130.
- [11] 严华. 再生混合混凝土及薄壁圆钢管再生混合短柱的轴压徐变性能试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. (YAN Hua. Creep behavior of cylinders made of DCBs & FC and thin-walled circular steel stub columns filled with DCBs & FC [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [12] 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. (WU Bo, LIU Wei, LIU Qiongxiang, et al. Experimental study on the behavior of recycled-concrete-segment/lump filled steel tubular stub column [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 32-38. (in Chinese))
- [13] 吴波, 刘伟, 刘琼祥, 等. 薄壁钢管再生混合短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 22-28. (WU Bo, LIU Wei, LIU Qiongxiang, et al. Axial behavior of thin-walled steel stub columns filled with demolished concrete segment/lump [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 22-28. (in Chinese))
- [14] 吴波, 许喆, 刘琼祥, 等. 薄壁钢管再生混合柱的抗剪性能试验[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 12-21. (WU Bo, XU Zhe, LIU Qiongxiang, et al. Test of the shear behavior of thin-walled steel tubular columns filled with demolished concrete segments/lumps [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(9): 12-21.

- (in Chinese))
- [15] WU B, ZHAO X Y, ZHANG J S, YANG Y. Cyclic testing of thin-walled circular steel tubular columns filled with demolished concrete blocks and fresh concrete [J]. Thin-Walled Structures, 2013, 66: 50-61.
 - [16] WU B, ZHAO X Y, ZHANG J S. Cyclic behavior of thin-walled square steel tubular columns filled with demolished concrete lumps and fresh concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 77: 69-81.
 - [17] 吴波, 赵新宇, 杨勇, 刘琼祥. 薄壁圆钢管再生混合柱-钢筋混凝土梁节点的抗震试验与数值模拟[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3): 59-69. (WU Bo, ZHAO Xinyu, YANG Yong, LIU Qionxiang. Seismic tests and numerical simulations on beam-to-column joints with demolished concrete blocks filled in thin-walled circular steel tubular columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3): 59-69. (in Chinese))
 - [18] 吴波, 刘春晖, 赵新宇, 等. 外置薄钢板再生混合墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 116-125. (WU Bo, LIU Chunhui, ZHAO Xinyu, et al. Experimental study on seismic behavior of double thin skin hybrid walls filled with demolished concrete lumps [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 116-125. (in Chinese))
 - [19] 骆志成. 再生混合组合楼板的力学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (LUO Zhicheng. Study on mechanical behaviors of composite slabs filled with demolished concrete blocks [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
 - [20] 吴波, 段静, 文波. 新型防火涂料的研制及再生混合组合楼板的耐火性能试验[J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 82-92. (WU Bo, DUAN Jing, WEN Bo. Preparations of new fireproof coating and fire-resistance tests on composite slabs filled with demolished concrete blocks and fresh concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 82-92. (in Chinese))
 - [21] 叶燕华, 孙锐, 薛洲海, 等. 预制墙板内现浇自密实混凝土叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 138-144. (YE Yanhua, SUN Rui, XUE Zhouhai, et al. Experimental study on seismic behavior of SCC and precast NC composite shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 138-144. (in Chinese))
 - [22] 王滋军, 刘伟庆, 魏威, 等. 钢筋混凝土水平拼接叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 147-155. (WANG Zijun, LIU Weiqing, WEI Wei, et al. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete composite shear wall with level splice [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 147-155. (in Chinese))
 - [23] 叶献国, 张丽军, 王德才, 等. 预制叠合板式混凝土剪力墙水平承载力实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(8): 1215-1218. (YE Xianguo, ZHANG Lijun, WANG Decai, et al. Experimental study on horizontal carrying capacity of superimposed slab shear walls [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2009, 32(8): 1215-1218. (in Chinese))
 - [24] 连星, 叶献国, 王德才, 等. 叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(8): 1219-1223. (LIAN Xing, YE Xianguo, WANG Decai, et al. Experimental analysis of seismic behavior of superimposed slab shear walls [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2009, 32(8): 1219-1223. (in Chinese))
 - [25] 张伟林, 沈小璞, 吴志新, 等. 叠合板式剪力墙 T 型、L 型墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 196-201. (ZHANG Weilin, SHEN Xiaopu, WU Zhixin, et al. Experimental study of seismic performance on T and L types superimposed slab shear walls structure [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 196-201. (in Chinese))
 - [26] 王滋军, 李向民, 王宇, 等. 带有约束边缘构件的预制叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2759-2767. (WANG Zijun, LI Xiangmin, WANG Yu, et al. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete composite shear wall with confined boundary member [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(8): 2759-2767. (in Chinese))
 - [27] 程积润. 钢管混凝土边缘约束叠合剪力墙抗震试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2018. (CHENG Jirun. Experimental study on the seismic behavior of concrete filled tube-confined sandwich shear walls [D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese))
 - [28] 张文莹, 杨联萍, 余少乐, 等. 双面叠合剪力墙关键问题研究: 水平连接节点抗震性能试验[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 32-45. (ZHANG Wenying, YANG Lianping, YU Shaole, et al. Research on key issues of the double-superimposed shear wall: experimental study on seismic performance of horizontal connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 32-45. (in Chinese))
 - [29] 吴曦, 汪梦甫. 预制叠合剪力墙新型连接节点抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(4): 73-85. (WU Xi, WANG Mengfu. Study on the seismic performance of precast composite shear wall with innovate connection joints [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(4): 73-85. (in Chinese))

(下转第 133 页)

hardened cement paste subjected to elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(4): 593-599.

- [18] 李清富, 孙振华, 张海洋. 粉煤灰和硅粉对混凝土强度影响的试验研究[J]. 混凝土, 2011(5): 77-79. (LI Qingfu, SUN Zhenhua, ZHANG Haiyang. Experiment about effect of fly ash and silicon fume on the strength of concrete [J]. Concrete, 2011(5): 77-79. (in Chinese))
- [19] 王晨霞, 张杰, 曹芙波. 粉煤灰掺量对再生混凝土力学性能和抗冻性的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(11): 3778-3783. (WANG Chenxia,

ZHANG Jie, CAO Fubo. Influence of fly ash content on mechanical properties and frost resistance of recycled concrete [J]. Bulletin of Chinese Ceramic Society, 2017, 36(11): 3778-3783. (in Chinese))

- [20] BOGA A R, TOPUC I B. Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 31: 258-264.
- [21] YUAN Q, SHI C, SCHUTTER G D, et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment-a review [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 1-13.

(上接第 123 页)

- [30] 董格, 谷倩, 谭圆, 等. 水平接缝连接方式对双面叠合剪力墙抗震性能影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(2): 107-114. (DONG Ge, GU Qian, TAN Yuan, et al. Experimental analysis on the seismic performance of prefabricated double-face superposed shear walls with different horizontal connection [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(2): 107-114. (in Chinese))
- [31] 刘璐. 再生块体混凝土的浇筑工艺及单轴受压性能试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. (LIU Lu. Test study on casting technology and uniaxial compressive behaviors of compound concrete made of demolished concrete lumps and fresh concrete [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [32] 钻芯法检测混凝土强度技术规程: CECS 03:2007 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2007. (Technical code for testing concrete strength by core drilling method: CECS 03:2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese))
- [33] 何岸. 钢套管再生混凝土加固柱力学性能研究[D].

广州: 华南理工大学, 2017. (HE An. Behavior of steel-jacket retrofitted column with recycled aggregated concrete [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese))

- [34] 罗婷. 震损圆钢管混凝土柱耐火性能试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. (LUO Ting. Experimental study on fire resistance of concrete filled circular steel tubular column with earthquake damage [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [35] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))
- [36] 刘春晖. 再生混合混凝土的受压尺寸效应及外置薄钢板再生混合墙的抗震性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013. (LIU Chunhui. Size effect on compressive behaviors of cubes and cylinders made of DCBs & FC and seismic behaviors of double thin skin hybrid walls filled with DCBs & FC [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese))