

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.03.010

内填棉花秸秆砌块生态复合墙体抗震性能研究

陈国新¹,黄 炜²,冯伟刚³

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055;
3. 西安市建筑设计研究院,陕西 西安 710021)

摘要:为验证棉花秸秆砌块与框格间的协同工作能力,制作1 梃内填棉花秸秆砌块材料的1:2 比例生态复合墙体模型进行伪静力抗震试验,研究内填棉花秸秆砌块生态复合墙体在低周反复荷载作用下的受力特点和破坏机制,并与内填加气混凝土砌块生态复合墙体的承载力、滞回特性、延性、强度退化、刚度退化等抗震性能进行对比。结果表明:棉花秸秆砌块与框格在弹性阶段协同工作性能较好,在弹塑性阶段较差;墙体发生强柱弱板剪切型破坏;内填棉花秸秆砌块生态复合墙体的抗倒塌能力较强。

关键词:棉花秸秆;生态复合墙体;模型试验;协同工作;抗震性能
中图分类号:TU317;TU352 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)03-0247-06

Experimental research on seismic behavior of ecological composite wall filled with cotton stalk block

CHEN Guoxin¹, HUANG Wei², FENG Weigang³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
3. Xi'an Architectural Design Research Institute, Xi'an 710021, China)

Abstract: To verify the performance of the collaborative work of the cotton straw block and frame, a pseudo-static seismic experimental study was conducted on the main failure process and loading characteristics of ecological composite walls filled with cotton stalk blocks with a ratio of 1:2 under low cyclic loading. The seismic behaviors of the ecological composite wall were compared with those of the composite wall filled with aerated concrete blocks in terms of bearing capacity, hysteresis loop behavior, ductility, and degradations of strength and stiffness. The results show that the performance of the collaborative work of the cotton straw block and frame was good in the elastic stage and bad in the elastic-plastic stage, a shear failure of the strong column and weak plate occurred in the composite wall, and the ecological composite wall filled with a cotton stalk block had a strong ability to resist collapse.

Key words: cotton stalk; ecological composite wall; model experiment; collaborative work; seismic behavior

生态复合墙结构体系^[1]是一种生态、节能、抗震的建筑结构体系,主要由预制的生态复合墙板与隐形外框及楼板装配整浇而成。作为结构的主要受力构件——生态复合墙体是由生态复合墙板与隐形外框组成的墙肢或墙段,如图1所示。其中,生态复合墙板是以截面和配筋较小的钢筋混凝土肋梁、肋柱为框格,内嵌以工农业废料或其他生态材料为主的高性能砌块^[2-3]预制而成。

本文将新疆地区农作物剩余物——棉花秸秆^[4]配置成棉花秸秆砌块填充到生态复合墙板中,以验证棉

花秸秆砌块生态填充块材与框格之间的协同工作能力,研究内填棉花秸秆砌块生态复合墙体在低周反复荷载作用下的受力特点和破坏机制,并与内填加气混凝土砌块生态复合墙体^[5]的抗震性能^[6-7]进行对比。

1 试验概况

本次试验对一榀 1:2 比例生态复合墙体模型^[8]进行试验,试件制作主要包括内填砌块预制、墙板预制及墙体装配浇筑 3 道工序^[9]。墙体编号为 ECW-7,试件的规格及配筋尺寸如下:长×高×厚为 1.4 m×1.44 m×0.1 m,框梁 100 mm,框柱 100 mm,肋梁 50 mm,肋柱 50 mm,框架钢筋中框梁为 4Φ6 mm,框柱 4Φ6 mm,箍筋 Φ4@100,肋格钢筋中框梁为 4Φ4 mm,框柱 4Φ4 mm,箍筋 Φ2@100。墙体外框材料为 C30 混凝土,墙板肋格为 C20 混凝土,内填砌块为棉花秸秆砌块^[10],其材料物理、力学性能参数见表 1。

试验采用伪静力抗震试验方法。根据相似关系,模型一次施加竖向荷载 110 kN,经二次分配后加在肋柱和框柱上;待竖向荷载稳定后,通过反力墙,借助液压作动器对墙体顶部施加水平荷载,采用力-位移混合控制。

2 试验过程及结果分析

2.1 墙体破坏过程

生态复合墙体在水平荷载与竖向荷载共同作用下,始终处于弯、剪、压复合受力状态^[11-12],加之试件在制作上的复杂性以及材料的多样性,墙体的破坏形态也是复杂、多样的。试验表明,ECW-7 在竖向荷载及水平荷载作用下,发生肋格先于外框破坏的剪切型破坏模式^[13]。试件的破坏过程大体可分为弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段^[14],其裂缝和墙体最终破坏情况见图 2,最终破坏照片见图 3。

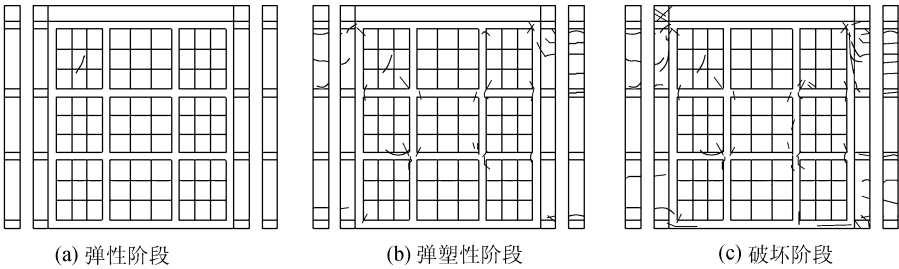


图 2 ECW-7 裂缝
Fig. 2 Three-stage cracking of ECW-7

2.2 测点应变分析

为便于研究,对同一方向荷载作用下生态复合墙体典型受力部位的钢筋应变变化趋势进行分析。

2.2.1 外框柱钢筋

在墙体所受荷载达到开裂荷载强度前,外框柱钢筋应变随荷载的增减呈线性变化;达到最大荷载后,外框柱内侧钢筋开始屈服,依然主要承受拉应力、压应力,墙体对称部位外框柱纵筋应变变化规律见图 4(a)。

2.2.2 肋柱钢筋

a. 边肋柱。如图 4(b)所示,对称边肋柱纵筋应变基本对

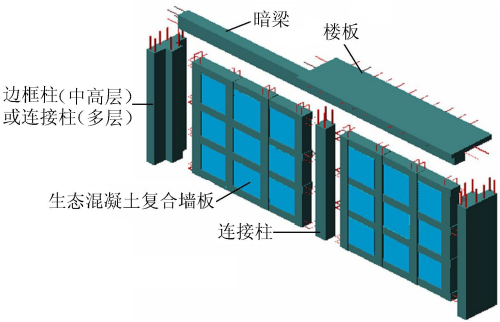


图 1 生态复合墙体构造示意图
Fig. 1 Structure of ecological composite wall

表 1 混凝土与砌块基本物理、力学性能参数

Table 1 Fundamental physical and mechanical properties of concrete and blocks			
材料类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa
C20 混凝土	2.55×10^3	27.6	3.00×10^4
C30 混凝土	2.55×10^3	40.8	3.25×10^4
棉花秸秆砌块	0.51×10^3	2.0	1.05×10^2



图 3 ECW-7 最终破坏
Fig. 3 Final failure of ECW-7

称分布,在墙体所受荷载达到开裂荷载强度之前基本呈线性分布,达到开裂荷载强度后,钢筋的应变曲线出现较明显的拐点。在达到墙体的最大荷载之前,钢筋的应变很小;在最大荷载之后,钢筋的应变突然下降。边肋柱钢筋均未屈服。

b. 中肋柱。如图 4(c)所示,水平荷载达到墙体屈服荷载之前,钢筋应变很小,随着肋梁钢筋屈服,墙体达到屈服荷载,内力发生重分布^[15],中肋柱承担了部分剪力,其底部钢筋发生突变应变。

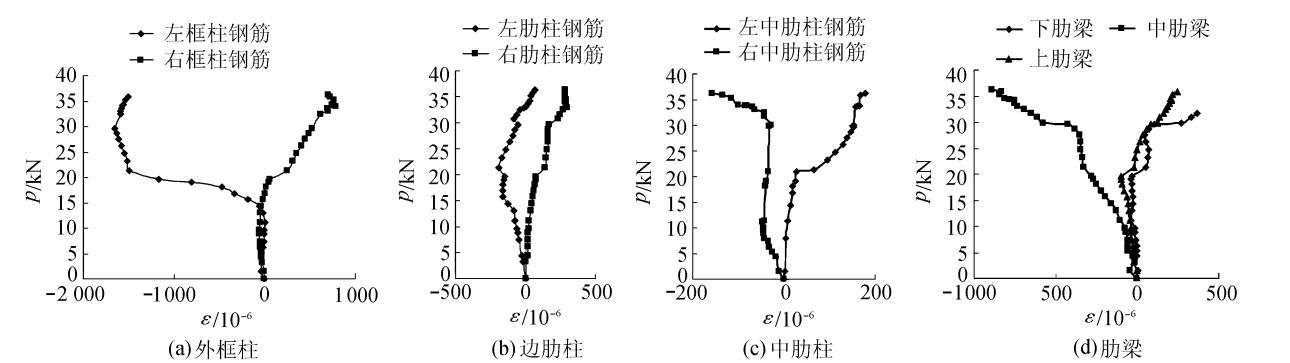


图 4 钢筋应变
Fig. 4 Strains of different steels

2. 2. 3 肋梁钢筋

墙体开裂前,肋梁钢筋应变很小;在墙体所受荷载达到开裂荷载强度之后,随着裂缝延伸至肋梁内,肋梁钢筋应变有明显增长;当大部分肋梁钢筋屈服时,墙体达到屈服荷载强度;以大位移循环时,肋梁钢筋大部分屈服,有的甚至被拉断,墙体的承载力下降,但下降的速度缓慢,当墙体的位移转角为 1/19 时,墙体的承载力仅下降了 10% 左右,墙体达到破坏。对比各肋梁钢筋应变可以发现:边肋梁的钢筋先于中肋梁屈服,体现了肋柱的销栓作用^[16];下层肋梁先于上层肋梁屈服,表明下层肋梁承担的剪力较大。同时,从试验中发现,砌块开裂,以及肋梁、肋柱开裂都未能引起承载力降低,而大量肋梁钢筋退出工作使得墙体的抗剪承载力开始降低,说明肋梁钢筋对墙体的抗剪承载力贡献较大。肋梁钢筋应变规律如图 4(d)所示。

3 抗震性能分析

课题组前期对内填加气混凝土砌块的生态复合墙体进行了大批不同工况下的抗震性能试验,且已建造了部分试点工程。为研究内填棉花秸秆砌块生态复合墙体的抗震性能,与前期相同规格和配筋的内填加气混凝土砌块复合墙体 ECW-1^[6]进行了对比分析。

3. 1 滞回曲线

ECW-7 在低周反复荷载作用下的滞回曲线见图 5(a)。

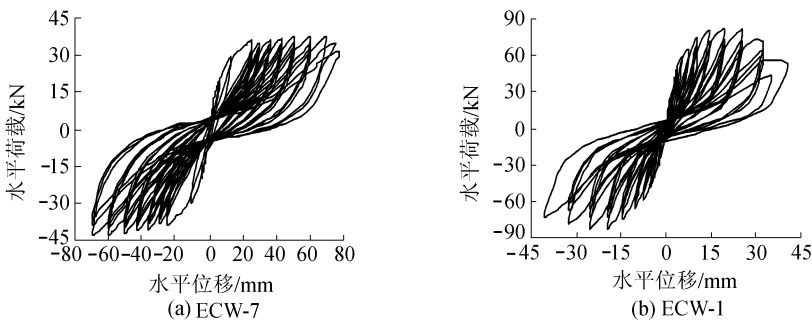


图 5 墙体滞回曲线
Fig. 5 Hysteresis loops of ecological composite walls

由图 5(a)可以看出,在弹性阶段,滞回曲线基本为直线,刚度值不变,试件整体性较好;随着荷载的增大,滞回曲线渐渐呈梭形,滞回环的面积也明显增大,出现残余变形,刚度明显退化;试件所受荷载达到最大后,墙体的承载力下降缓慢,位移增长较快,表现出良好的延性;此后以大位移循环时,棉花秸秆砌块与肋格间的滑移现象已非常突出,滞回环中部的捏缩现象越来越明显,滞回曲线呈明显反 S 形。

ECW-1 滞回曲线见图 5(b)。由图 5(b)可以看出,在加载后期,ECW-1 的滞回环比 ECW-7 更加饱满,捏拢现象更明显,这主要是因为加气混凝土砌块是脆性材料,在反复荷载作用下开裂、破碎甚至剥落,而棉花秸秆砌块是一种柔性填充材料,在试验的后期也仅有大量裂缝出现,未出现破碎剥落现象。

3.2 骨架曲线

由图 6 中 2 榀墙体的骨架曲线对比可知:

- a. ECW-7 具有持续的承载能力,在加载后期,由于剪切和滑移变形较大,棉花秸秆砌块基本退出工作,生态复合墙体可看成一纯钢筋混凝土框架^[11-12]承受荷载,所以复合墙体的变形很大,而荷载却下降不明显。
- b. ECW-1 的承载力高,极限位移小,而 ECW-7 的承载力低,极限位移大,说明内填材料的强度和弹性模量是影响生态复合墙体水平承载力和变形的主要因素。

3.3 特征荷载及特征位移

2 榀生态复合墙体的开裂点、屈服点、最大荷载点和极限荷载点^[5]4 个特征点^[17]的荷载和相应位移见表 2。

表 2 墙体特征荷载和特征位移

墙体 编号	开裂点		屈服点		最大荷载点		极限位移点	
	开裂荷载 p_{cr}/kN	开裂位移 Δ_{cr}/mm	屈服荷载 p_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	最大荷载 p_{max}/kN	最大位移 Δ_{max}/mm	极限荷载 p_{μ}/kN	极限位移 Δ_{μ}/mm
ECW-7	14.1	3.0	32.3	16.8	42.0	60.0	30.7	77.6
ECW-1	21.0	1.3	64.8	7.6	81.6	19.5	70.7	32.5

由表 2 可以看出:

- a. ECW-7 开裂荷载值较小,其值为最大荷载的 33.6%,而屈服荷载、最大荷载与极限荷载三者相差不大。随着棉花秸秆砌块中的裂缝变宽、变长,以及砌块与混凝土肋格之间的黏结滑移破坏,墙体退化成一个多肋格式框架构件独立承担竖向和水平荷载,说明在加载后期,内填的棉花秸秆砌块与肋格二者之间的协同工作能力较差。
- b. ECW-7 构件的变形较大,从开裂到屈服,再到荷载达到最大时,位移成倍增长,且增长速度很快,说明内填棉花秸秆砌块的生态复合墙体变形能力较强。
- c. 棉花秸秆砌块的立方体抗压强度与加气混凝土砌块相差不大,但弹性模量远小于加气混凝土砌块,ECW-7 构件各特征点处位移均是 ECW-1 的 2~3 倍,而特征点处 ECW-1 墙体的特征荷载值是 ECW-7 墙体的 2~3 倍,说明内填砌块的抗裂能力、弹性模量、与肋格的连接性能这几个因素之间的作用相互耦合,共同影响生态复合墙体的受力性能。

3.4 位移延性和相对变形值

位移延性系数通常是指骨架曲线下降到 $0.85F_{max}$ 时所对应的极限位移与屈服位移的比值,其表达式为

$$\mu = \frac{\Delta_{\mu}}{\Delta_y}$$

式中: μ ——结构位移延性系数; Δ_{μ} ——极限位移; Δ_y ——屈服位移,其中屈服点位置按面积互等法^[18]确定。

定义相对变形值为 Δ/H ,其中 Δ 是生态复合墙体顶端的侧向位移, H 为生态复合墙体的高度。 μ 和相对变形值见表 3。由表 3 可见:

- a. ECW-7 μ 为 4.6,说明墙体延性较好,虽然墙体极限位移和屈服位移都比 ECW-1 大,但从屈服开始到极限点,ECW-7 墙体位移经历了较长的历程,所以延性系数较大。
- b. 2 榀生态复合墙体弹性阶段

表 3 延性系数和位移相对变形值

Table 3 Ductility coefficient and relative deformation					
墙体 编号	μ	相对变形值			
		Δ_{cr}/H	Δ_y/H	Δ_{μ}/H	Δ_{max}/H
ECW-7	4.6	1/1467	1/83	1/23	1/18
ECW-1	4.3	1/1077	1/184	1/72	1/43

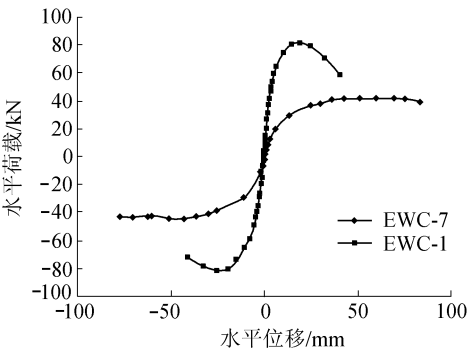


图 6 墙体骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of ecological composite walls

的相对变形值(即弹性层间位移转角)范围在 1/1 077 ~ 1/1 467,表明在弹性阶段,墙体的变形能力相差不多。极限破坏时的相对变形值范围在 1/43 ~ 1/18,表明生态复合墙体具有较好的弹塑性变形能力,一直到加载结束,都没有出现墙体倒塌现象,具有较好的抗倒塌能力。

3.5 刚度退化

2 槓墙体的平均刚度^[17]退化对比曲线见图 7。对比图 7 可知:

a. ECW-7 刚度衰减曲线总体趋势是加载初期的刚度退化较快,随着位移的增加,塑性变形不断发展,刚度衰减速度变慢,最后趋于平缓。整个刚度衰减比较均匀,没有明显的刚度突变。对比 2 槓墙体的刚度退化趋势,墙体的刚度退化规律基本相同,刚度退化速度基本一致。

b. ECW-1 的初始刚度大,ECW-7 的初始刚度小,这是因为内填的加气混凝土砌块的弹性模量达 1 105 MPa,而棉花秸秆砌块的弹性模量仅为 105 MPa,并且制作墙体时,棉花秸秆砌块之间的拼缝较大,砌块与框格间的黏结力较差。

c. ECW-7 和 ECW-1 墙体达到极限破坏时的刚度相差不多,主要是因为墙体在弹塑性阶段的末期,内填砌块几乎都退出工作,大部分的荷载都由肋梁、肋柱和外框承担。

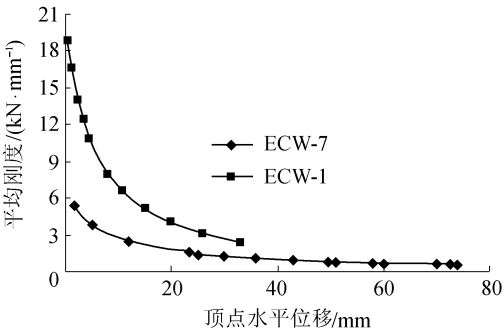


图 7 复合墙体刚度退化
Fig. 7 Degradation of stiffness of ecological composite walls

4 结 论

- a. 棉花秸秆砌块与框格在弹性阶段协同工作性能较好,在弹塑性阶段较差。
- b. 内填棉花秸秆砌块生态复合墙体在压、弯、剪作用下发生强柱弱板剪切型破坏。
- c. 内填棉花秸秆砌块生态复合墙体在弹塑性阶段受力过程中,水平荷载值呈较平缓的上升趋势,且墙体的骨架曲线的延伸段较长,延性较好,刚度退化平缓。
- d. 内填棉花秸秆砌块墙体破坏后,墙体的层间位移角达到 1/18,未出现倒塌现象,抗倒塌能力较强。

参考文献:

[1] 姚谦峰,黄炜,田洁,等. 密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2004,25(6):67-74. (YAO Qianfeng,HUAGN Wei,TIAN Jie,et al. Experimental analyses of mechanical characteristics and seismic performance of multi-ribbed panel wall[J]. Journal of Building Structures,2004,25(6):67-74. (in Chinese)))

[2] 阿肯江·托呼提,沙吾列提·拜开依,曹耿,等. 土坯砌体抗压强度试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(3):290-291. (AKENJIANG Tuohuti,SAWULET Bekey,CAO Geng,et al. Experimental study on compressive strength of adobe masonry[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2011,39(3):290-291. (in Chinese))

[3] 阿肯江·托呼提,赵成,秦拥军,等. 改性土体材料的抗压强度试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(3):263-265. (AKENJIANG Tuohuti,ZHAO Cheng,QIN Yongjun,et al. Experimental tests on compressive strength of modified soil materials[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2010,38(3):263-265. (in Chinese))

[4] 宗望远,袁巧霞,丁羽,等. 新疆棉花秸秆气化技术应用现状与建议[J]. 塔里木大学学报,2008,20(4):91-94. (ZONG Wangyuan,YUAN Qiaoxia,DING Yu,et al. Actuality and suggestion on gasifying cotton stalk in XinJiang[J]. Journal of Tarim University,2008,20(4):91-94. (in Chinese))

[5] 唐强. 秸秆泥坯生态复合墙体抗震性能及抗震设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.

[6] 陈国新,黄炜,姚谦峰. 植物纤维复合墙体抗震性能研究[J]. 新疆农业大学学报,2010,33(5):431-435. (CHEN Guoxin,HUANG Wei,YAO Qianfeng. Study on earthquake-resistant performance of plant fiber composite wall[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University,2010,33(5):431-435. (in Chinese))

[7] 陈国新,黄炜,张荫. 内填不同材料填充砌块生态复合墙体抗震性能对比[J]. 中南大学学报:自然科学版,2012,43(11):4491-4500. (CHEN Guoxin,HUANG Wei,ZHANG Yin. Comparison on seismic behavior of ecological composite walls filled with different materials block [J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2012,43(11):4491-4500. (in Chinese))

[8] 姚谦峰,陈平. 土木工程结构试验[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[9] 陈海燕. 现砌加强肋生态复合墙体抗震性能及受剪承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.

[10] 冯伟刚. 棉秆纤维砌块力学性能研究及生态复合墙体受力性能分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.

[11] 樊东峰. 开洞生态复合墙体抗震性能试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.

[12] 成晓峰. 基于框格变化的生态复合墙体抗震性能研究及择优评价[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.

[13] 席秋红. 生态复合墙体破坏模式研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.

[14] 路振锋. 生态复合墙体抗震性能试验研究及基于统一强度理论的抗剪承载力分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.

[15] 田鹏. 型钢混凝土边框柱密肋复合墙体承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.

[16] 师永恒. 基于投资-效益准则的密肋壁板结构分灾抗震设计方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2007.

[17] 孙国华,顾强,何若全,等. 半刚接钢框架内填暗竖缝钢筋混凝土剪力墙结构滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010,31(9):11-26. (SUN Guohua, GU Qiang, HE Ruquan. et al. Experimental investigation of partially-restrained steel frame with concealed vertical slits RC infill walls[J]. Journal of Building Structures, 2010,31(9):11-26. (in Chinese))

[18] 孙跃东,肖建庄,周德源,等. 再生混凝土框架抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5):9-15. (SUN Yuedong, XIAO Jianzhuang ZHOU Deyuan, et al. An experimental study on the seismic behavior of recycled concrete frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(5):9-15. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学6名专家入选教育部高等学校教学指导委员会

2013年4月23日,教育部印发了《关于成立2013—2017年教育部高等学校教学指导委员会的通知》,河海大学6名专家入选,分别是:校长王乘教授任水利类专业教学指导委员会主任;副校长鞠平教授为电气类专业教学指导委员会委员;教务处处长阮怀宁教授为水利类专业教学指导委员会秘书长;地球科学与工程学院院长周志芳教授为地质类专业教学指导委员会委员;地球科学与工程学院岳建平教授为测绘类专业教学指导委员会委员;力学与材料学院赵振兴教授为力学基础课程教学指导委员会委员。

高等学校教学指导委员会是教育部聘请并领导的专家组织,具有非常设学术机构的性质,接受教育部的委托,开展高等学校本科教学的研究、咨询、指导、评估、服务等工作。

(本刊编辑部供稿)