

# 废弃混凝土掺合型再生混凝土的力学性能\*

朱慈勉 李坛

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对当前再生混凝土工程应用所面临的再生骨料生产成本高昂和废弃混凝土利用率偏低的问题, 提出将废弃混凝土经适当破碎和湿水后直接与新拌混凝土混合拌制工程用混凝土, 制得一种新型的再生混凝土材料——废弃混凝土掺合型再生混凝土。拌制该再生混凝土所用废弃混凝土块的最大粒径可达 50~80 mm, 扩大了废弃混凝土在降低生产成本方面的优势, 同时提高了废弃混凝土的利用率。对 150、300 mm 模数废弃混凝土掺合型再生混凝土试件以及废弃混凝土掺合型再生混凝土板的力学性能进行了研究。结果表明: 废弃混凝土掺合型再生混凝土具有良好的力学性能, 即使在废料掺量达到 30%~40% 时, 其抗压强度、抗拉强度和弹性模量仍很接近相应强度等级的普通混凝土; 废弃混凝土掺合型再生混凝土板的冲切承载力及破坏特征与普通混凝土板相近。

**关键词:** 废弃混凝土; 废弃混凝土掺合型再生混凝土; 抗压强度; 抗拉强度; 弹性模量; 冲切承载力

中图分类号: TU528

doi: 10.3969/j.issn.1000-565X.2014.02.009

近年来, 有关环境保护和资源充分利用的问题越来越受到国际社会的普遍关注。在建筑领域, 全球年均因工程施工、旧建筑拆除、战争以及地震等原因产生的建筑垃圾数量惊人, 其中废弃混凝土的产生量占到其中的 30%~50%<sup>[1]</sup>。废弃混凝土既占用了大量土地, 又污染了环境。另一方面, 全球工程用混凝土粗骨料的开采量也非常巨大, 造成了自然资源的过度消耗和环境破坏。

前苏联学者 Gluzhge<sup>[2]</sup> 早在 1946 年就对利用废弃混凝土制作再生骨料的可行性进行了研究。20 世纪中期, 日本、美国和一些欧洲发达国家先后开始了再生混凝土的研究和开发利用, 其研究的重点集中在再生骨料和再生混凝土的力学性能方面<sup>[3-10]</sup>。Hansen 等<sup>[11]</sup> 的研究表明, 再生骨料混凝土与相同配比的普通混凝土相比, 抗压强度约低 5%~30%; 文献<sup>[12]</sup> 的研究表明, 再生混凝土的抗压强度比普通混凝土的约低 14%~32%, 且其抗压强度随再生骨料取代率的增加而明显下降。

在再生混凝土结构构件的受力性能方面, 肖建庄等<sup>[13]</sup> 和胡琼等<sup>[14]</sup> 分别从不同角度对再生混凝土梁的抗弯性能进行了试验研究; Han 等<sup>[15]</sup> 和 Fathifazl 等<sup>[16]</sup> 先后从不同的影响因素出发对再生混凝土梁的受剪性能进行了试验研究; 吴波等<sup>[17-18]</sup> 研究了将废弃混凝土构件破碎、分割成较大尺度的块体或节段置入钢管柱等形成的再生混合构件的力学性能。

普通的再生混凝土是指在拌制混凝土时利用一定比例的从废弃混凝土中经破碎、碾压清理和筛分所提取的粗骨料。但再生粗骨料的提取和加工工艺比较复杂且成本高昂, 在很大程度上限制了普通再生混凝土在实际工程中的应用。而将较大尺度的废弃混凝土块体或节段适当置入待浇筑构件中制成再生混合构件的做法较难适应机械化施工要求。文中提出的废弃混凝土掺合型再生混凝土是指将废弃混凝土破碎至一定程度, 经湿水后按适当比例直接掺入新拌混凝土中制成的再生混凝土, 旨在适应工业化大规模生产、施工并适用于各种结构构件的要求。

收稿日期: 2013-07-04

\* 基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAK48B00)

作者简介: 朱慈勉(1947-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构分析和再生混凝土结构研究。E-mail: zcm@tongji.edu.cn

文中通过试验研究了废弃混凝土掺合型再生混凝土的抗压、抗拉强度及弹性模量等基本力学性能,同时研究了再生混凝土板的冲切承载力。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 材料

试验中所采用的废弃混凝土块是将混凝土搅拌站提供的商品混凝土在实验室中浇筑、养护成混凝土柱形试件后经人工破碎得到,块体分别为粒径 25~50mm 和 25~80mm 自然级配。拌制废弃混凝土掺合型再生混凝土所用的新鲜混凝土为商品混凝土。为确定试验中人工浇筑的废弃混凝土与在真实工程中采集的废弃混凝土力学性能是否一致,进行了相应试件的抗压强度对比试验,对比试验均针对废弃混凝土强度等级为 C30、掺量为 30% 的废弃混凝土掺合型再生混凝土立方体的试件抗压强度进行,其结果如表 1 所示。其中真实废弃混凝土的采集对象是一座拆除的已建成 36 年的工业厂房,其混凝土强度通过现场取芯后试压获得。由表 1 可见,在同等条件下,掺入人工废弃混凝土和真实废弃混凝土拌制而成的再生混凝土的抗压性能几乎完全一致。

表 1 真实与人工废弃混凝土掺合型再生混凝土立方体的试件抗压强度比较

Table 1 Comparison of cube compressive strength between actual and manual waste concrete-participated recycled concrete

混凝土类型	抗压强度/MPa	平均值/MPa
真实废弃混凝土掺合型再生混凝土	33.53	33.86
	33.71	
	34.33	
人工废弃混凝土掺合型再生混凝土	33.46	33.06
	32.59	
	34.13	

### 1.2 废弃混凝土掺合型再生混凝土的拌制

在拌制废弃混凝土掺合型再生混凝土前需对所用的废弃混凝土块进行湿水处理,以防止其较强的吸水性对新鲜混凝土乃至最终的再生混凝土产品的性能产生不良影响。湿水处理的方法是先将其在清水中浸泡 1h 再沥至面干备用。经测定,此时其饱和度可达 90% 以上。试验中将经湿水处理的废弃混凝土块与新鲜商品混凝土混合后人工拌制废弃混凝土掺合型再生混凝土,并进行试件的制作。废弃混凝土掺量以质量分数(以废弃混凝土掺合型再生混凝土的质量为基准)计。以上的拌制过程充分考虑了机械化大工业生产与施工的可能性。

## 2 基本力学性能

基本力学性能试件的制作、试验过程及强度换算方法等均按国家技术规程<sup>[19-20]</sup>的要求进行。试验包括了立方体试件和棱柱体试件两类。试件的尺寸是依据拌制废弃混凝土掺合型再生混凝土时所掺入的废弃混凝土块的最大粒径确定的。试验考虑了掺入的废弃混凝土与新拌混凝土的强度以及废弃混凝土掺入量等因素。

### 2.1 150 mm 模数废弃混凝土掺合型再生混凝土试件的力学性能

#### 2.1.1 立方体试件抗压强度

共制作 150 mm × 150 mm × 150 mm 的标准立方体抗压强度试件 23 组。制作试件所用废弃混凝土的强度和新拌混凝土的强度分为 4 种不同情况;废弃混凝土的掺量在 0~46% 之间分 6 种情况,其中掺量为 0 的即为普通混凝土对照组。试件分组情况和试验测得的立方体试件抗压强度如表 2 所示。

由表 2 可见:废弃混凝土掺合型再生混凝土的立方体抗压强度与普通混凝土接近;不同掺量下,相比于普通混凝土试件,再生混凝土试件的平均抗压强度降幅不大于 8.2%;废弃混凝土掺量在 0~46% 之间时,对废弃混凝土掺合型再生混凝土试件的抗压强度影响不明显。考虑到施工中对混凝土和易性的要求,建议使用时废弃混凝土掺量取 30% 左右。

#### 2.1.2 立方体试件抗拉强度

按照国家技术规程<sup>[19]</sup>,文中采用 150 mm × 150 mm × 150 mm 的混凝土立方体试件的劈裂强度试验结果,按式(1)换算得到废弃混凝土掺合型再生混凝土的抗拉强度:

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中:  $f_{ts}$  为 150 mm × 150 mm × 150 mm 混凝土立方体试件的劈裂抗拉强度, MPa;  $F$  为试件劈裂破坏荷载, N;  $A$  为试件劈裂面面积, mm<sup>2</sup>。

试验共制作边长 150 mm 的立方体试件 3 组。所用的废弃混凝土和新拌混凝土的强度等级均为 C30,废弃混凝土的掺量分为 0(对照组)、20% 和 30% 3 种情况。由试件劈裂荷载换算得到的混凝土抗拉强度如表 3 所示,表中同时也列出了相应的立方体试件抗压强度。

表2 150 mm × 150 mm × 150 mm 废弃混凝土掺合型再生混凝土立方体试件的抗压强度

Table 2 Chbe compressive strength of 150 mm × 150 mm × 150 mm waste concrete-participated recycled concrete specimens

废弃混凝土掺量 /%	废弃混凝土 C20 , 新拌混凝土 C30		废弃混凝土 C30 , 新拌混凝土 C30		废弃混凝土 C20 , 新拌混凝土 C40		废弃混凝土 C40 , 新拌混凝土 C30	
	抗压强度 /MPa	平均值 /MPa						
0	31.73		33.98		40.39			
	31.48	30.91	34.96	34.11	43.00	41.41		
	29.53		33.40		40.84			
10	32.18		31.46		40.44		32.84	
	28.34	30.86	33.93	32.23	40.37	40.65	32.56	32.30
	32.06		31.29		41.14		31.50	
20	30.09		34.16		40.77		31.75	
	30.37	30.46	34.85	34.92	40.16	40.03	32.27	32.08
	30.92		35.74		39.16		32.21	
30	28.57		35.07		41.99		32.52	
	27.98	28.81	35.98	34.54	39.54	40.91	31.77	32.08
	29.87		32.57		41.20		31.94	
40	28.85		33.26		42.40		33.08	
	28.15	28.39	34.01	34.29	43.07	41.22	33.63	33.72
	28.16		35.60		38.18		34.46	
46	32.14		32.11		39.80		32.10	
	30.88	31.00	32.89	32.16	41.51	40.32	32.22	32.17
	29.97		31.48		39.64		32.20	

表3 150 mm × 150 mm × 150 mm 废弃混凝土掺合型再生混凝土试件的抗拉强度

Table 3 Tensile strength of 150 mm × 150 mm × 150 mm waste concrete participated recycled concrete specimens

废弃混凝土掺量 /%	抗拉强度 /MPa	抗拉强度平均值 /MPa	抗压强度 /MPa	抗压强度平均值 /MPa	抗拉强度与抗压强度的比值
0	2.94		33.98		
	3.09	2.95	34.96	34.11	0.086
	2.83		33.40		
20	2.73		34.16		
	2.78	2.71	34.85	34.92	0.078
	2.70		35.74		
30	2.77		35.07		
	2.57	2.75	35.98	34.54	0.080
	2.91		32.57		

由表3所示结果可见,试验条件下的废弃混凝土掺合型再生混凝土的平均抗拉强度相比于普通混凝土约降低7%。

### 2.1.3 棱柱体试件抗压强度

按照相关规程<sup>[19]</sup>,共制作截面尺寸为150 mm × 150 mm、高度为300 mm的棱柱体抗压强度试件6组,分别对应废弃混凝土掺量的6种情况。试件制作所用的废弃混凝土的强度等级为C20,新拌混凝土强度等级为C40。对应每组棱柱体试件还各制作1组立方体试件。试验测得的废弃混凝土掺合型再生混凝土棱柱体试件的抗压强度如表4所示。

由表4可见:废弃混凝土掺合型再生混凝土棱柱体试件的抗压强度随废弃混凝土掺量的提高而逐步降低,当掺量达30%时,其抗压强度降低约15%;废弃混凝土掺合型再生混凝土棱柱体抗压强度与其立方体抗压强度的比值在0.70~0.75之间,与普通混凝土的情况十分接近。

表 4 150 mm × 150 mm × 300 mm 废弃混凝土掺合型再生混凝土棱柱体试件的抗压强度

Table 4 Prism compressive strength of 150 mm × 150 mm × 300 mm waste concrete-participated recycled concrete specimens

废弃混凝土掺量/%	棱柱体抗压强度/MPa		立方体抗压强度/MPa		棱柱体抗压强度/立方体抗压强度
	试验值	平均值	试验值	平均值	
	0	33.14 34.54	33.84	49.36 46.27	
10	34.42 30.12	33.27	45.01 47.35	46.18	0.70
20	29.01 31.97	30.49	43.41 44.66	44.04	0.70
30	31.61 27.53	29.57	39.15 39.50	39.33	0.75
40	24.40 29.74	27.07	37.83 35.08	36.46	0.74
46	21.95 31.24	26.60	38.14 37.72	37.93	0.70

2.1.4 弹性模量

为测定废弃混凝土掺合型再生混凝土的弹性模量,按照相关技术规程<sup>[19]</sup>制作了150mm×150mm×300mm的废弃混凝土掺合型再生混凝土棱柱体试件1组(共6件),其中3件用于测定其轴心抗压强度,另3件用于测定弹性模量。试件制作所用的废弃混凝土和新拌混凝土强度等级均为C30,废弃混凝土的掺量为30%。为与普通混凝土对照,另外制作了一组未掺废料的普通混凝土试件。

采用上海雷韵试验仪器制造有限公司生产的TM-II型混凝土弹性模量测定仪测试混凝土的弹性模量,结果如表5所示。由表5可见,当废弃混凝土的掺量为30%时,废弃混凝土掺合型再生混凝土的弹性模量仅比普通混凝土低9.6%,这一数值远小于一般文献中所报道的普通再生混凝土弹性模量的降幅(20%~30%)。

表 5 废弃混凝土掺合型再生混凝土试件的弹性模量

Table 5 Elastic modulus of waste concrete-participated recycled concrete specimens

废弃混凝土掺量/%	弹性模量/GPa	平均值/GPa
0	35.3	34.35
	33.4	
	34.4	
30	28.3	30.97
	33.4	
	31.2	

2.2 300 mm 模数废弃混凝土掺合型再生混凝土试件的抗压强度

在使用条件允许时,采用较大粒径的废弃混凝土块拌制废弃混凝土掺合型再生混凝土可以大大降低此类再生混凝土的生产成本并提高废料的利用率。通常混凝土立方体抗压强度试件的几何尺寸应不小于骨料最大粒径的3倍,为此进行了300mm模数立方体试件的抗压强度试验。试验共制作边长300mm的立方体抗压强度试件8组。试件制作所采用的废弃混凝土和新拌混凝土强度等级相同,分为C30和C40两种情况;所用的废弃混凝土块的最大粒径达80mm,掺量在0~40%之间分4种情况。由于试件的破坏荷载达3000kN以上,试验在同济大学建筑结构实验室内采用同济大学研制、济南试金集团有限公司生产的10000kN大型多功能结构试验机进行。

按照相关技术规程<sup>[20]</sup>,对300mm模数试件的立方体抗压强度乘以1.15的增大系数后得到的折算抗压强度如表6所示。由表6可见,掺入较大粒径废弃混凝土块拌制的再生混凝土依然具有较好的抗压强度,与150mm模数再生混凝土试件相比,其立方体抗压强度仅降低约6%。

表 6 300 mm 模数废弃混凝土掺合型再生混凝土立方体试件的抗压强度

Table 6 Cube compressive strength of 300 mm module waste concrete-participated recycled concrete specimens

废弃混凝土掺量/%	废弃混凝土、新拌混凝土强度等级为C30时			废弃混凝土、新拌混凝土强度等级为C40时		
	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa	抗压强度折算值/MPa	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa	抗压强度折算值/MPa
	0	29.63			41.90	
26.82		26.82	30.84	38.15	38.24	43.98
20.31				34.66		
20	30.33			40.50		
	31.43	30.39	34.95	37.89	40.05	46.06
	29.43			41.77		
30	30.83			38.38		
	32.75	30.90	35.54	27.09	38.38	44.14
	29.11			38.67		
40	26.59			33.73		
	30.05	28.14	32.36	29.97	32.79	37.71
	27.78			34.65		

### 3 废弃混凝土掺合型再生混凝土板的冲切承载力

房屋建筑的基础底板是废弃混凝土掺合型再生混凝土的宜用场合,因其设计通常是由冲切承载力所控制,所以文中对废弃混凝土掺合型再生混凝土板的冲切承载力进行了研究。

#### 3.1 废弃混凝土掺合型再生混凝土板试件的制作

共制作混凝土板抗冲切试件3件,其尺寸与配筋情况如图1所示。其中废弃混凝土掺合型再生混凝土板抗冲切试件2件,制作时所采用的废弃混凝土和新拌混凝土强度设计等级均为C30,废弃混凝土块的最大粒径为50mm,废弃混凝土掺量为30%;另一件则为相同混凝土强度等级和配筋的普通混凝土板对照试件。

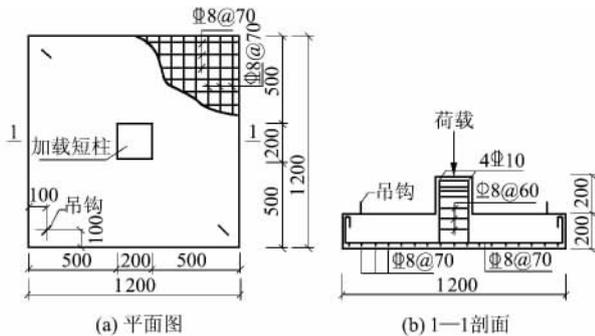


图1 混凝土板抗冲切试件(单位: mm)

Fig. 1 Concrete slab specimens for punching test( Unit: mm)

由于抗冲切试件的制作、就位与设备安装工作较为复杂和耗时,实际试验时掺入的废弃混凝土的龄期已达114d,相应的标准立方体试件抗压强度已由原设计值增高至36.33 MPa。

#### 3.2 试验加载过程

试验荷载由千斤顶施加于板中央处的加载短柱上。加载过程分为预加载阶段(加载至板预估开裂荷载的70%,持续10min后卸载,并将数据采集系统初始化)、正式加载阶段(在达到板预估冲切承载力的90%前每级加载值为预估冲切承载力的15%~20%,此后每级加载不超过预估冲切承载力的5%,每级荷载持续10min)、破坏后加载阶段(在板发生冲切破坏后拆除板面布置的仪器仪表,继续对其加载,此时加载量由位移控制,最大位移行程为50~90mm)3个阶段。

#### 3.3 试验结果及分析

在废弃混凝土掺合型再生混凝土板冲切承载力

试验过程中,当荷载达到板冲切承载力的60%时,板上表面围绕加载柱头四边出现环形裂纹。破坏后加载阶段板冲切破坏锥体继续被推出,板上表面出现径向裂缝,如图2所示。

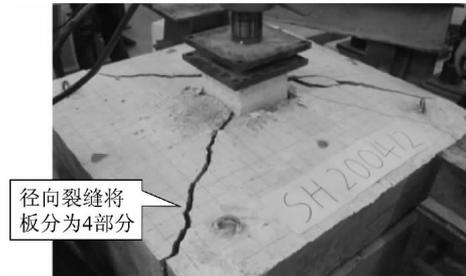


图2 冲切破坏后板上表面的裂缝

Fig. 2 Cracks on upper surface of slab after punching failure

试验测得的板冲切承载力如表7所示。为便于比较,表7中列出的废弃混凝土掺量为30%的板的冲切承载力是根据废弃混凝土的实际强度(36.33 MPa)折算得到的,即

$$\text{折算值} = \text{实际测值} \times \frac{30}{30 + (36.33 - 30) \times 30\%}$$

由表7可见,试验条件下的废弃混凝土掺合型再生混凝土板的冲切承载力相比于普通混凝土板仅降低1.2%。

表7 废弃混凝土掺合型再生混凝土板冲切承载力

Table 7 Punching bearing capacity of waste concrete participated recycled concrete slabs

废弃混凝土掺量/%	冲切承载力/kN	平均值/kN
0	504.2	504.2
30	507.9	497.9
	487.9	

## 4 结论

文中通过对150mm模数废弃混凝土掺合型再生混凝土立方体及棱柱体试件、300mm模数废弃混凝土掺合型再生混凝土立方体试件以及废弃混凝土掺合型再生混凝土板的力学性能进行研究,得出结论:

(1) 废弃混凝土掺合型再生混凝土相对于普通再生混凝土可以大大降低生产成本并明显提高废弃混凝土的利用率。考虑到施工中对混凝土和易性方面的要求,建议使用时废弃混凝土的掺量取30%左右。

(2) 废弃混凝土掺量不大于46%的情况下,废弃混凝土掺合型再生混凝土具有良好的抗压、抗拉以及弹性模量等力学性能。即使在废弃混凝土掺量

达到 30% 时,其立方体抗压强度和抗拉强度与普通混凝土相比降幅仍在 10% 以内;棱柱体抗压强度的降幅约在 15%;弹性模量的降幅小于 10%。

(3) 所利用的废弃混凝土块最大粒径增大至 80 mm,进一步扩大了废弃混凝土在降低生产成本方面的优势,同时提高了废弃混凝土的利用率;但此时与 150 mm 模数再生混凝土试件相比,抗压强度约降低 6%。

(4) 当废弃混凝土掺量达 30% 时,废弃混凝土掺合型再生混凝土板的冲切承载力与普通混凝土板相比仅降低 1.2%,说明废弃混凝土掺合型再生混凝土结构构件也同样具有良好的力学性能,表明废弃混凝土掺合型再生混凝土有着广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社 2008.
- [2] Gluzhge P J. The work of scientific research institute [J]. *Gidrotekhnicheskoye Stroitel' stvo*, 1946 4: 27-28.
- [3] Evangelista L, Brito D J. Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates [J]. *Cement & Concrete Composites* 2007 29(5): 397-401.
- [4] Tabsh S W, Abdelfatah A S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete [J]. *Construction and Building Materials* 2009 23(2): 1163-1167.
- [5] Sagoe-Crentsil K K, Brown T, Taylor A H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate [J]. *Cement and Concrete Research* 2001 31(5): 707-712.
- [6] Gayarre F L, Serna P, Domingo A et al. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties [J]. *Waste Management*, 2009 (12): 3022-3028.
- [7] 杨海峰, 孟少平, 邓志恒. 高强再生混凝土常规三轴受压本构曲线试验 [J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2011 32(5): 597-601.  
Yang Hai-feng, Meng Shao-ping, Deng Zhi-heng. Stress-strain curves of high-performance recycled concrete under conventional triaxial compression [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition* 2011 32(5): 597-601.
- [8] 朋改非, 黄艳竹, 张九峰. 骨料缺陷对再生混凝土力学性能的影响 [J]. *建筑材料学报* 2012 15(1): 80-84.  
Peng Gai-fei, Huang Yan-zhu, Zhang Jiu-feng. Influence of defects in recycled aggregate on mechanical properties of recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials* 2012 15(1): 80-84.
- [9] 张永娟, 何舜, 张雄, 等. 再生混凝土 Bolomey 公式的修正 [J]. *建筑材料学报* 2012 15(4): 538-543.  
Zhang Yong-Juan, He Shun, Zhang Xiong, et al. Modification of the bolomey formula in recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials* 2012 15(4): 538-543.
- [10] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系 [J]. *建筑材料学报*, 2013 16(1): 24-32.  
Chen Zong-ping, Xu Jin-jun, Zheng Hua-hai, et al. Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concretes [J]. *Journal of Building Materials* 2013 16(1): 24-32.
- [11] Hansen T C. Recycling of demolished concrete and masonry [R]. London: Spon Press, 1992: 37-DRC.
- [12] BCSJ. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete [J]. *Concrete Journal*, 1978 16(7): 18-31.
- [13] 肖建庄, 兰阳. 再生粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究 [J]. *特种结构* 2006 23(1): 9-12.  
Xiao Jian-zhuang, Lan Yang. Test and study on flexural behavior of recycled coarse aggregate concrete beam [J]. *Special Structures* 2006 23(1): 9-12.
- [14] 胡琼, 黄清, 邹超英. 部分再生混凝土梁的试验 [J]. *哈尔滨工业大学学报* 2009 41(6): 38-42.  
Hu Qiong, Huang Qing, Zou Chao-ying. Experimental study on partial recycled concrete beams [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology* 2009 41(6): 38-42.
- [15] Han B C, Yun H, Chung S et al. Shear capacity of reinforced concrete beams made with recycled-aggregate [J]. *ACI Special Publication* 2001 200: 503-516.
- [16] Fathifazl G, Razaqpur A G, Burkan Isgor O et al. Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams [J]. *Engineering Structures*, 2011 33(3): 1025-1033.
- [17] 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 Qiong-xiang, 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.
- [18] 吴波, 赵新宇, 杨勇. 采用大尺度废弃混凝土的再生混合构件研究进展 [J]. *华南理工大学学报: 自然科学版* 2012 40(10): 174-183.  
Wu Bo, Zhao Xin-yu, Yang Yong et al. Regeneration structural members containing large-size demolished concrete: a review [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition* 2012 40(10): 174-183.
- [19] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
- [20] DLT 5150—2001, 水工混凝土试验规程 [S].

## Mechanical Properties of Waste Concrete-Participated Recycled Concrete

Zhu Ci-mian Li Tan

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to reduce the production cost of recycled aggregate and improve the utilization rate of waste concrete in common engineering application of recycled concrete, a new type of recycled concrete material named waste concrete-participated recycled concrete was prepared by straightly blending wet and broken waste concrete block with fresh concrete. The maximum size of waste concrete block for blending is up to 50 ~ 80 mm, which may expand the superiority of waste concrete in reducing the production cost and improving its utilization rate. Then, mechanical behavior studies were conducted for the 150 or 300 mm module specimens and the slabs of waste concrete-participated recycled concrete. The results show that, even when the participation rate of waste concrete reaches 30% ~ 40%, the compressive strength, tensile strength and elastic modulus of the prepared recycled concrete are very close to those of common concrete in the same strength grade, which means that the recycled concrete possesses ideal mechanical properties. Moreover, it is also found that both the punching bearing capacity and the failure characteristics of the recycled concrete slabs are very close to those of common concrete slabs.

**Key words:** waste concrete; waste concrete-participated recycled concrete; compressive strength; tensile strength; elastic modulus; punching bearing capacity

(上接第49页)

## Certification of Dienestrol Purity Reference Material and Its Uncertainty Evaluation

Jiang Feng<sup>1</sup> Wang Zhi-long<sup>2</sup> Wang Qiao-yun<sup>2</sup> Shen Yu-xing<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Guangzhou Institute of Measurement Testing Technology, Guangzhou 510030, Guangdong, China)

**Abstract:** In this paper, first, certified reference material (CRM) for the purity determination of dienestrol was prepared by means of semi-preparative high-performance liquid chromatography. Next, a qualitative analysis of the raw materials was performed by using liquid chromatography-mass spectrometry, <sup>1</sup>H NMR, <sup>13</sup>C NMR and infrared spectroscopy. Then, the content of organic main ingredients in the prepared CRM was determined via the multi-lab certification with HPLC, and the homogeneity and stability of the CRM were measured. Moreover, the contents of water, ash, volatile materials and inorganic elements were analyzed, with an uncertainty evaluation of the CRM being finally carried out. The results indicate that (1) the prepared CRM possesses good homogeneity and is of a stable storage period of 12 months; (2) the contents of water, ash, volatile materials and inorganic elements in the prepared CRM of dienestrol are all less than 0.1%; and (3) the prepared CRM is of a certified purity of 99.4% and a relative expanded uncertainty of 0.6% ( $k=2$ ).

**Key words:** dienestrol; certified reference material; high-performance liquid chromatography; certification; uncertainty