

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201905003



# 再生块体混凝土的单轴受压试验

蔡敏伟<sup>1,2</sup>, 王卫华<sup>1,2</sup>, 董毓利<sup>1,2</sup>, 洪铁东<sup>1</sup>, 陈香蓉<sup>1</sup>, 郭秀泉<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 华侨大学 厦门市抗火综合防灾工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 首先,将抗压强度分别为 26.7,45.0,87.6 MPa 的 3 种旧混凝土块体与普通商品混凝土进行混合浇筑,制作 18 个再生块体混凝土立方体试件和 18 个棱柱体试件. 然后,进行立方体试件和棱柱体试件的单轴受压试验,研究旧混凝土的取代率及新旧混凝土的抗压强度差对再生块体混凝土受压力学性能的影响. 结果表明:在添加低抗压强度(26.7,45.0 MPa)旧混凝土的试件中,新旧混凝土结合良好,界面难以辨别;在添加较高抗压强度(87.6 MPa)旧混凝土的棱柱体试件中,新旧混凝土的结合界面出现分离现象;试件的破坏形态似 2 个对顶的角锥形状;在新旧混凝土抗压强度差不变的情况下,再生块体混凝土的抗压强度、弹性模量、峰值应变随旧混凝土取代率的增加而降低,取代率对抗压强度影响较大,但对弹性模量、峰值应变的影响较小;在新旧混凝土抗压强度差不同、取代率相同的情况下,随着旧混凝土块体抗压强度的增大,再生块体混凝土的抗压强度、弹性模量、峰值应变均呈一定的上升趋势;再生块体混凝土的泊松比变化不明显,平均值约为 0.212.

**关键词:** 再生块体混凝土; 抗压强度; 取代率; 弹性模量; 峰值应变; 泊松比

中图分类号: TU 375.2      文献标志码: A      文章编号: 1000-5013(2020)01-0019-07

## Experiment on Uniaxial Compression of Compound Concrete Made of Demolished Concrete Lumps and Fresh Concrete

CAI Minwei<sup>1,2</sup>, WANG Weihua<sup>1,2</sup>, DONG Yuli<sup>1,2</sup>,  
HONG Tiedong<sup>1</sup>, CHEN Xiangrong<sup>1</sup>, GUO Xiuquan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. Xiamen Engineering Research Center for Fire Resistance and Disaster Prevention,  
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Three kinds of demolished concrete lumps (DCLs compressive strengths=26.7, 45.0, 87.6 MPa) were mixed with ordinary commercial concrete to cast 18 cube specimens and 18 prism specimens that both consist of compound concrete made of DCLs and fresh concrete. The uniaxial compression tests of cube and prism specimens were carried out, and the influence of the replacement ratio of DCLs and the strength difference between the new and demolished concrete on the specimen's compressive behaviors was investigated. The results show that referring to the specimens with old concrete of low compressive strength (26.7, 45.0 MPa), the old and new concrete are well combined and the interfaces are difficult to distinguish; but prism specimens with old concrete of high compressive strength (87.6 MPa), show a phenomena of separation of bonding interface between new and old concrete; the specimen's failure shape is similar to two pyramid shapes on the top; under the condition of constant difference of compressive strength between new and old concrete, the compre-

ssive strength, elastic modulus and peak strain of the compound concrete decrease with the increase of the replacement ratio of the old concrete, and the influence of the replacement ratio on the compressive strength is more significant than that on the elastic modules and peak strain; under constant replacement ratio but different compressive strength of the new and old concrete, the increase of the strength of demolished concrete lumps increases the compressive strength, elastic modules and the peak strain; the Poisson's ratio of the specimens varies little,  $\approx 0.212$ .

**Keywords:** compound concrete made of demolished concrete lumps and fresh concrete; compressive strength; replacement ratio; elastic modulus; peak strain; Poisson's ratio

20 世纪 90 年代以来,我国面临许多钢筋混凝土结构的修复和拆除问题,由此产生大量的建筑废弃物,其中,废弃混凝土约占建筑垃圾的 48.4%<sup>[1]</sup>,合理利用废弃混凝土可以保护环境,减少固体废弃物排放,节约资源和能源.再生骨料孔隙率较高、初始裂缝多、吸水性大<sup>[2]</sup>,与普通混凝土的力学性能差异较大.肖建庄等<sup>[3-4]</sup>、陈宗平等<sup>[5-6]</sup>针对再生骨料混凝土的受压力学性能进行研究.吴波等<sup>[7]</sup>将废弃混凝土拆解成特征尺寸为 60~300 mm 的块体混凝土<sup>[8]</sup>,直接应用于构件中,形成再生混合混凝土构件,并进行静力和抗震性能的研究<sup>[9-11]</sup>.张金锁<sup>[12]</sup>研究废弃混凝土块体的取代率、新旧混凝土的抗压强度差等因素对再生混合混凝土立方体试件抗压强度的影响.Wu 等<sup>[13]</sup>发现当新旧混凝土抗压强度差较大时,废旧混凝土块体对再生块体混凝土抗压强度的影响较为明显,并提出抗压强度的预测公式.此外,吴波等<sup>[14]</sup>发现随着旧混凝土取代率的增加,试件组合抗压强度、弹性模量均呈降低趋势.刘春晖<sup>[15]</sup>发现在特征比不变的情况下,尺寸效应对再生混凝土立方体试件的弹性模量、峰值应变的影响可以忽略不计.目前,关于再生块体混凝土棱柱体试件受压力学性能的报道较为少见<sup>[12-15]</sup>.基于此,本文对 18 个再生块体混凝土立方体试件和 18 个棱柱体试件进行单轴受压试验,分析不同因素对再生块体混凝土受压力学性能的影响.

# 1 试验概况

## 1.1 试件制作

制作 18 个再生块体混凝土立方体试件和 18 个棱柱体试件,每 3 个标准试件为 1 组,共分为 6 组立方体试件和 6 组棱柱体试件.

试件的设计参数,如表 1 所示.表 1 中: $N$  为试件数量; $l, b, h$  分别为试件的长、宽和高; $f_o$  为旧混凝土的抗压强度; $\eta$  为旧混凝土的取代率;试件组编号 Cu 表示立方体试件,Pr 表示棱柱体试件,R1~R3 对应不同的旧混凝土的抗压强度,0~0.3 对应不同的旧混凝土的取代率;Cu-R1-0,Pr-R1-0 中旧混凝土的取代率为 0,即新混凝土试件.

表 1 试件的设计参数  
Tab.1 Design parameters of specimens

试件组编号	$N$	$l/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$f_o/\text{MPa}$	$\eta/\%$
Cu-R1-0	3	150	150	150	26.7	0
Cu-R1-0.1	3	150	150	150	26.7	10
Cu-R1-0.2	3	150	150	150	26.7	20
Cu-R1-0.3	3	150	150	150	26.7	30
Cu-R2-0.2	3	150	150	150	45.0	20
Cu-R3-0.2	3	150	150	150	87.6	20
Pr-R1-0	3	150	150	300	26.7	0
Pr-R1-0.1	3	150	150	300	26.7	10
Pr-R1-0.2	3	150	150	300	26.7	20
Pr-R1-0.3	3	150	150	300	26.7	30
Pr-R2-0.2	3	150	150	300	45.0	20
Pr-R3-0.2	3	150	150	300	87.6	20

将废旧混凝土(剪力墙、梁和柱等)人工拆解成特征尺寸为 50~60 mm 的块体.选用抗压强度分别为 26.7,45.0,87.6 MPa 的 3 种旧混凝土块体.旧混凝土块体和试件的浇筑,如图 1 所示.在浇筑前,先

将旧混凝土块体用网兜编号装好,置于自来水池内,提前充分浸泡 24 h,使其吸足水分并洗净表面浮尘.在浇筑过程中,先在试模底部倒入一层厚度约为 20~30 mm 的新混凝土;然后,将旧混凝土块体与新混凝土交替放入试模内,充分振捣,使两者能充分接触.

新混凝土的抗压强度等级为 C30,采用红狮牌 42.5R 普通硅酸盐水泥,碎石粒径为 16.0~31.5 mm,坍落度为 120 mm.

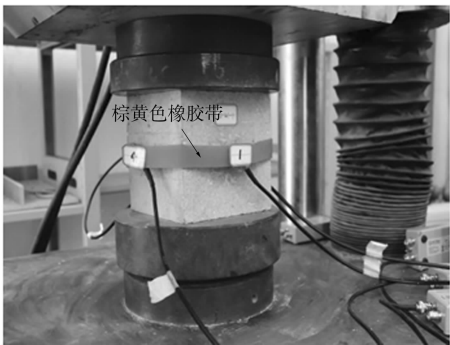
新混凝土的配合比,如表 2 所示.表 2 中: $\delta$  为含砂率; $\rho$  为材料的用量.新混凝土的 28 d 立方体试件的抗压强度为 42.3 MPa.

表 2 新混凝土的配合比  
Tab. 2 Mix proportions of new concrete

水灰比	$\delta/\%$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$						
		水	水泥	砂	石子	粉煤灰	矿渣	减水剂
0.49	38	263.00	698.00	775.00	1 148.00	42.00	42.00	5.38

1.2 试验加载装置及加载制度

在华侨大学结构实验室 SHT4206 型电液伺服万能试验机上进行试验.试件的加载装置,如图 2 所示.图 2 中:棕黄色橡胶带来固定声发射传感器探头.



(a) 立方体试件



(b) 棱柱体试件

图 2 试件的加载装置

Fig. 2 Loading setup of specimens

采用全程位移控制的加载制度,立方体试件的加载速率<sup>[16]</sup>为  $3\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,棱柱体试件的加载速率为  $6\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .为了测量棱柱体试件的弹性模量和泊松比,在沿试件高度的中轴线处粘贴混凝土应变片;在棱柱体试件上部左右对称布置两个高精度位移计,以记录试件的压缩变形;应变、荷载和位移则由计算机自动采集.

2 结果与分析

2.1 试验现象

在加载初期,立方体与棱柱体试件的表面未观察到裂纹开展;随着荷载的增加,试件表面逐渐出现细微裂纹.当荷载  $P$  为峰值荷载  $P_u$  的 60% ( $P=0.6P_u$ ) 时,在立方体试件中部可观察到裂纹逐渐扩展,且伴有细小的开裂响声;当荷载达到峰值荷载 ( $P\geq P_u$ ) 后,立方体试件的裂纹发展变宽且较快,荷载突然降低而丧失承载力.当荷载为峰值荷载的 60%~80% ( $P=0.6P_u\sim0.8P_u$ ) 时,棱柱体试件的裂缝首先在中部出现,与竖向约呈  $30^\circ$  夹角斜向发展;随着荷载的增加,裂缝的长度和宽度逐渐增大,达到峰值荷载 ( $P\geq P_u$ ) 后,棱柱体试件中部可见明显裂纹,裂纹最宽处约为 1.5 mm.再生块体混凝土试件的裂纹

开展较稳定,破坏过程较缓慢,这一破坏过程与文献[17]的情况类似.

再生块体混凝土立方体试件和棱柱体试件的典型破坏过程,如图 3,4 所示. 图 3,4 中:试件编码的最后一位数字对应每组的 3 个试件(1~3).

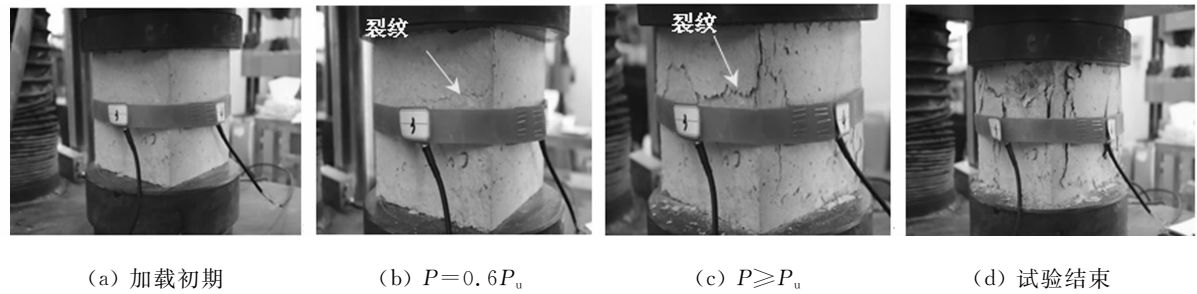


图 3 立方体试件的典型破坏过程(Cu-R1-0.3-3)

Fig. 3 Typical failure process of cubic specimen (Cu-R1-0.3-3)

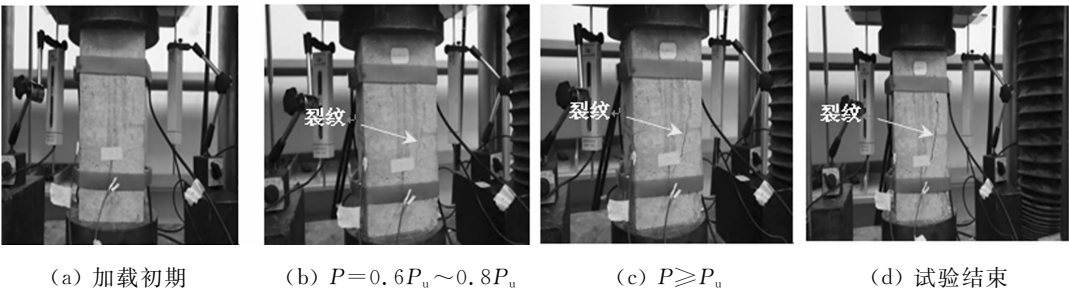


图 4 棱柱体试件的典型破坏过程(Pr-R2-0.2-3)

Fig. 4 Typical failure process of prism specimen (Pr-R2-0.2-3)

加载结束后,试块断裂面的典型破坏形态,如图 5 所示. 由图 5 可知:添加低抗压强度旧混凝土的试件的新旧骨料界面难以辨别,新混凝土与旧混凝土结合良好;而添加高抗压强度(87.6 MPa)旧混凝土的棱柱体试件在新旧混凝土的结合界面上出现破坏现象. 再生块体混凝土试件的破坏形态与新混凝土试件基本一致,都是形成两个近似对顶的角锥形状.

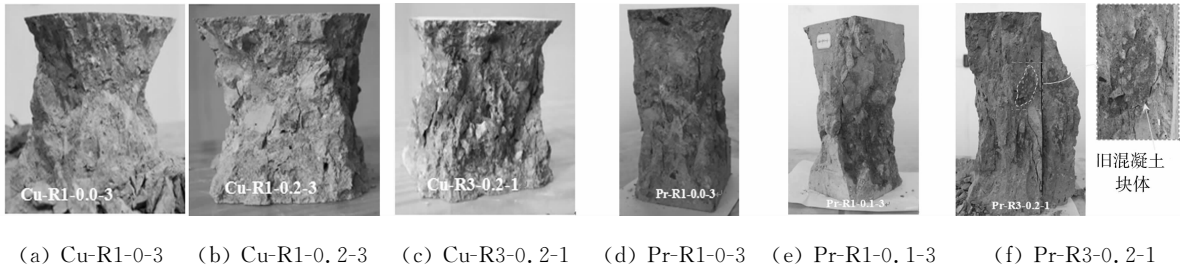


图 5 试件断裂面的典型破坏形态

Fig. 5 Typical failure mode of fracture surfaces of specimens

2.2 抗压强度实测结果分析

参照文献[18],对不同参数下的每组 3 个标准试件的抗压强度取平均值,将其作为立方体试件的代

表抗压强度  $f_{cu}$  和棱柱体试件的代

表抗压强度  $f_c$ . 各组试件抗压强度的相关参数,如表 3 所示.

由表 3 可以得到以下 4 点结论. 1) 当新旧混凝土抗压强度差(46.2-26.7=19.5 MPa)相同时,随着旧混凝土的取代率从 0 增加至 30%,立方体试件与棱柱体试件的抗压强度均逐渐降低,立方体试件

表 3 各组试件的抗压强度的相关参数

Tab. 3 Relevant parameters of compressive strength of each groups pecimens

参数	试件组编号					
	R1-0	R1-0.1	R1-0.2	R1-0.3	R2-0.2	R3-0.2
$f_{cu}/\text{MPa}$	46.2	44.9	39.3	36.9	52.0	53.4
$f_c/\text{MPa}$	43.3	35.3	31.7	29.1	40.3	44.6
$f_c/f_{cu}$	0.94	0.78	0.81	0.79	0.78	0.83

的抗压强度下降 20.1%, 棱柱体试件的抗压强度下降 32.8%。2) 当再生块体混凝土的取代率相同时, 随着旧混凝土抗压强度的提高, 立方体试件和棱柱体试件的抗压强度呈上升趋势, 这与文献[19]在低抗压强度新混凝土中添加高抗压强度的旧混凝土块体而呈现的抗压强度值的增大规律一致。3) 当旧混凝土的抗压强度(45.0 MPa)与新混凝土的抗压强度(46.2 MPa)基本相同时, 立方体试件的抗压强度比新混凝土试件略高, 但棱柱体试件的抗压强度却比新混凝土试件略低。4) 再生块体混凝土棱柱体试件与立方体试件的抗压强度之比为 0.78~0.83, 平均值为 0.80, 小于新混凝土对比试件的比值 0.94, 该值仍比 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[20]</sup>要求的比值(0.76)略高, 但与试件抗压强度换算公式相比, 其值仍在安全范围之内。

再生块体混凝土由新混凝土和旧混凝土两部分混合组成, 故组合的抗压强度与两者的混凝土抗压强度存在一定关系。文献[12-13]分别提出了不同的立方体试件的组合抗压强度公式, 即

$$f_{\text{cu,com},300} = f_{\text{cu,new},300} (1 - \eta) + f_{\text{cu,old},300} \times \eta,$$

(1)

$$f_{\text{cu,com},300} = (f_{\text{cu,old},300} / f_{\text{cu,new},300})^{0.86\eta} \times f_{\text{cu,new},300} (1 - \eta) + (f_{\text{cu,new},300} / f_{\text{cu,old},300})^{1.1\eta} \times f_{\text{cu,old},300} \eta.$$

(2)

式(1),(2)中: $f_{\text{cu,com},300}$ 表示边长为 300 mm 的立方体试件的组合抗压强度; $f_{\text{cu,new},300}$ , $f_{\text{cu,old},300}$ 分别为边长为 300 mm 的立方体试件中新混凝土和旧混凝土的抗压强度。

式(1)适用于新旧混凝土的抗压强度差小于 15 MPa 的情况, 式(2)适用于新旧混凝土的抗压强度差为 41~86 MPa 的情况<sup>[12-13]</sup>。文献[14]将式(1),(2)应用于棱柱体试件, 并建议将两式计算结果的平均值作为抗压强度的预测值。在文中新旧混凝土抗压强度差的范围内, 立方体试件及经转换后的棱柱体试件的抗压强度皆采用式(1),(2)进行计算。

抗压强度计算值与试验值的对比, 如表 4 所示。表 4 中: $f_{\text{cu,com}}$ , $f_{\text{cu,m}}$ 分别表示抗压强度的计算值和试验值; $\bar{f}_{\text{cu,com}}$ 为式(1),(2)抗压强度计算结果的平均值; $\gamma_1$ 为式(1)计算值与试验值的误差, $\gamma_2$ 为式(2)计算值与试验值的误差, $\gamma_3$ 为式(1),(2)计算平均值与试验值的误差; $\gamma$ 为误差平均值; $\sigma$ 为均方差。试件抗压强度的计算值与试验值的对比, 如图 6 所示。

由表 4 和图 6 可以得到以下 3 点结论。1) 当新旧混凝土的抗压强度差相同时, 立方体试件的组合抗压强度计算值与试验值的偏差随取代率的增大而增大。当取代率小于 20%时, 计算值与试验值吻合地较好; 随着取代率的增大, 试验值比计算值降低的幅度更大(图 6(a))。2) 当取代率均为 20%时, 随着旧混凝土抗压强度的增加, 立方体和棱柱体试件的组合抗压强度的计算值与试验值的偏差先增大后减小, 最大误差约为 12.0%, 最小误差约为 0.5%。3) 当新旧混凝土的抗压强度差相同时, 式(1),(2)计算结果的平均值 $\bar{f}_{\text{cu,com}}$ 与试验值的误差基本在±10.0%以内, 总体上吻合地较好(图 6(b)), 故可用式(1),(2)计算结果的平均值来计算立方体和棱柱体试件的组合抗压强度的预测值。

表 4 抗压强度的计算值与试验值的对比

Tab. 4 Comparisons between calculated and measured compressive strengths

试件组编号	$f_{\text{cu,m}}/\text{MPa}$	式(1)		式(2)		$\bar{f}_{\text{cu,com}}/\text{MPa}$	$\gamma_3/\%$
		$f_{\text{cu,com}}/\text{MPa}$	$\gamma_1/\%$	$f_{\text{cu,com}}/\text{MPa}$	$\gamma_2/\%$		
Cu-R1-0.1	44.9	44.2	−1.5	40.9	−8.9	42.6	−5.1
Cu-R1-0.2	39.3	42.3	7.6	39.7	1.1	41.0	4.3
Cu-R1-0.3	36.9	40.3	9.2	38.5	4.3	39.4	6.8
Cu-R2-0.2	52.0	46.0	−11.5	45.8	−11.9	45.9	−11.7
Cu-R3-0.2	53.4	54.5	2.1	56.5	5.8	55.5	3.9
Pr-R1-0.1	35.3	38.4	8.8	32.7	−7.4	35.6	0.8
Pr-R1-0.2	31.7	33.8	6.6	31.7	0	32.8	3.5
Pr-R1-0.3	29.1	32.3	10.9	30.8	5.8	31.6	8.6
Pr-R2-0.2	40.3	36.8	−8.7	36.7	−8.9	36.8	−8.8
Pr-R3-0.2	44.6	43.6	−2.2	45.2	1.3	44.4	−0.5
$\gamma/\%$			2.1		−1.9		0.2
$\sigma$			7.86		6.73		6.73

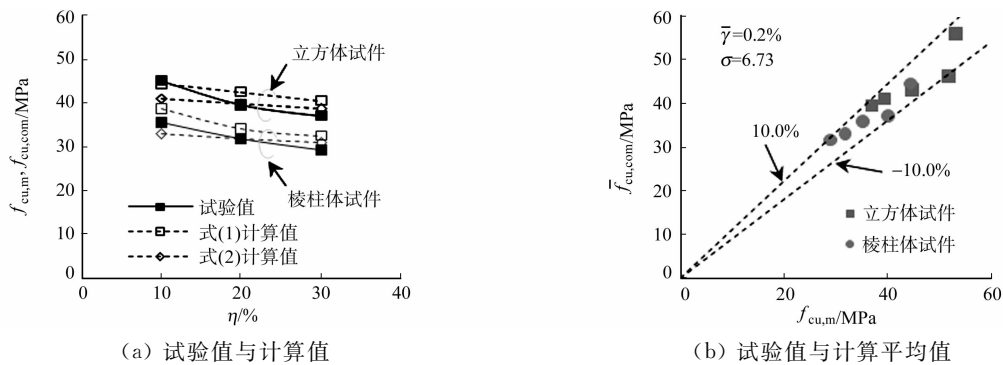


图 6 试件抗压强度的计算值与试验值对比

Fig. 6 Comparison of calculated results of specimens compressive strength with test results

2.3 弹性模量实测结果分析

将每组中 3 个棱柱体试件的弹性模量平均值作为该组再生块体混凝土的弹性模量的代表值. 棱柱体试件组的实测结果, 如表 5 所示. 表 5 中:  $E$  为弹性模量;  $\epsilon_{\max}$  为峰值应变;  $\mu$  为泊松比;  $\beta, \theta$  分别为峰值应力比和峰值应变比, 即再生块体混凝土与新混凝土峰值应力或应变的比值.

由表 5 可以得到以下 2 点结论. 1) 当新旧混凝土的抗压强度差相同时, 棱柱体试件的弹性模量随取代率的增大而降低, 当取代率从 0 增加至 30% 时, 弹性模量降低 11.9% 左右. 2) 当旧混凝土的取代率相同时, 棱柱体试件的弹性模量与旧混凝土的抗压强度有一定的关系, 添加比新混凝土抗压强度低 (26.7, 45.0 MPa) 的旧混凝土试件的弹性模量比新混凝土试件组的弹性模量降低 4.2%, 6.1%, 而添加抗压强度更高 (87.6 MPa) 的旧混凝土的试件组与新混凝土试件组的弹性模量基本相当.

表 5 棱柱体试件组的实测结果

Tab. 5 Measured results of prism specimens

试件组编号	$E/\times 10^{10} \text{ MPa}$	$\epsilon_{\max}/\times 10^{-3}$	$\mu$	$\beta$	$\theta$
Pr-R1-0	2.61	2.163	0.220	1.00	1.00
Pr-R1-0.1	2.55	2.181	0.206	0.82	1.01
Pr-R1-0.2	2.50	1.962	0.216	0.73	0.91
Pr-R1-0.3	2.30	1.913	0.206	0.67	0.88
Pr-R2-0.2	2.45	2.238	0.206	0.93	1.03
Pr-R3-0.2	2.60	2.140	0.220	1.03	0.99

2.4 峰值应变实测结果分析

应力-应变曲线峰值处的应力对应的应变为峰值应变. 由表 5 可知: 棱柱体试件的峰值应变范围为  $1.913 \times 10^{-3} \sim 2.238 \times 10^{-3}$ ; 取代率对棱柱体试件与新混凝土试件峰值应力比影响较大, 当取代率从 0 增加至 30% 时, 峰值应力下降 33%, 当取代率在 10% 以内时, 取代率对峰值应变的影响较小, 波动范围在 12% 内, 当取代率超过 10% 后, 峰值应力比和峰值应变比随着取代率的增加而下降, 且下降趋势基本一致; 添加高抗压强度的旧混凝土试件的峰值应变与新混凝土试件基本一致.

2.5 泊松比实测结果分析

由表 5 还可知: 在弹性阶段, 再生块体混凝土的泊松比范围为 0.206~0.220, 平均值为 0.212, 与普通混凝土的泊松比 (0.180~0.220) 相差不大; 当新旧混凝土抗压强度差不变时, 再生块体混凝土比新混凝土试件的泊松比略降, 但差异不大; 当取代率相同时, 泊松比变化不大, 且未呈现明显的变化规律.

3 结论

1) 当新旧混凝土的抗压强度差相同时, 随着旧混凝土取代率的增加, 再生块体混凝土的抗压强度、弹性模量均逐渐降低, 且抗压强度下降得较为明显. 当取代率从 0 增加至 30% 时, 立方体试件的抗压强度下降 20.1%, 棱柱体试件的抗压强度下降 32.8%, 棱柱体试件的弹性模量降低 11.9%.

2) 当旧混凝土的取代率相同时, 随着旧混凝土抗压强度的增大, 再生块体混凝土的抗压强度、弹性模量均呈一定的上升趋势. 当旧混凝土的抗压强度与新混凝土基本相同时, 立方体试件的抗压强度略高

于新混凝土试件,但棱柱体试件的抗压强度却略低;当旧混凝土的抗压强度高于新混凝土时,立方体试件的抗压强度高于新混凝土试件,但棱柱体抗压强度的增幅不大。

3) 棱柱体试件与立方体试件的抗压强度之比为 0.78~0.83,平均值为 0.80,与现行规范公式的估算结果相比,其值仍在安全范围之内。

4) 当取代率超过 10%后,峰值应力比和峰值应变比随取代率的增加而下降。在弹性阶段,再生块体混凝土的泊松比范围为 0.206~0.220,平均值为 0.212,泊松比变化不大,且未呈现明显的变化规律。

5) 在添加低抗压强度(26.7,45.0 MPa)旧混凝土的试件中,新旧混凝土结合良好,界面难以辨别;在添加较高抗压强度(87.6 MPa)旧混凝土的棱柱体试件中,新旧混凝土的结合界面出现分离现象。

参考文献:

[1] 朱红兵,王顺林,熊汉林,等. 混凝土废弃物的再生利用[J]. 公路交通技术,2005(1):52-53. DOI:10.3969/j.issn.1009-6477.2005.01.016.

[2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[3] 肖建庄,杜江涛. 不同再生粗集料混凝土单轴受压应力-应变全曲线[J]. 建筑材料学报,2008,11(1):111-115. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2008.01.021.

[4] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1445-1449. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2008.01.021.

[5] 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. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2013.01.005.

[6] 陈宗平,陈宇良,姚侃. 再生混凝土三轴受压力学性能试验及其影响因素[J]. 建筑结构学报,2014,35(12):72-81. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.12.010.

[7] 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.

[8] 广东省住房和城乡建设厅. 再生块体混凝土组合结构技术规程: DBJ/T 15-113—2016[S]. 北京:中国城市出版社,2016.

[9] 吴波,赵新宇,张金锁. 薄壁圆钢管再生混合柱的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(11):1-12.

[10] 吴波,计明明. 薄壁 U 形外包钢再生混合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(4):246-254. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.04.032.

[11] 吴波,骆志成. 压型钢板再生混合混凝土组合楼板受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(5):29-38. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.05.004.

[12] 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.

[13] WU Bo,ZHANG Shuyi,YANG Yong. 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.

[14] 吴波,刘璐,赵霄龙. 自密实再生混合混凝土的单轴受压试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(增刊 2):73-78,126. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.S2.011.

[15] 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.

[16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C39/C39M-17b[S]. Philadelphia:ASTM International,2012.

[17] 张舒怡. 再生混合混凝土高强化效应的初步试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.

[18] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2001[S]. 北京:中国电力出版社,2002.

[19] 龚继豪,刘春晖,吕克文. 形状和取代率对再生混合混凝土抗压性能的影响[J]. 混凝土,2017(4):99-103. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2017.04.024.

[20] 中华人民共和国城乡与住房建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.