

文章编号: 1001-4888(2014)05-635-06

钢筋再生混凝土梁徐变性能试验研究^{*}

安新正, 王小学

(河北工程大学 土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 为揭示钢筋再生混凝土梁的徐变性能, 通过三种持荷水平下 9 根钢筋再生混凝土梁试件的徐变(徐变应变与徐变挠度)对比试验, 分析了钢筋再生混凝土梁徐变与时间的相关关系, 研究了加荷幅值、初始变形(初始应变、初始挠度)等因素对钢筋再生混凝土梁徐变性能的影响规律, 揭示了钢筋再生混凝土梁的徐变机理。研究表明: 在 45% 极限荷载水平的持续作用下, 钢筋再生混凝土梁总徐变挠度值为初始挠度值的 62% 左右, 并且在前期发展较快, 7d 发展至总徐变挠度值的 64% 左右, 后期变缓; 钢筋再生混凝土梁徐变随着施加荷载幅值、初始变形的升高而有所增加。经历徐变过程后的钢筋再生混凝土梁, 其承载性能有所下降, 变化趋势为总徐变值越大, 降低的幅度也越大。

关键词: 再生混凝土; 钢筋再生混凝土梁; 徐变; 承载性能; 试验研究

中图分类号: TU523.59; TU502.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-13-196

0 引言

混凝土的徐变是指在受荷不变的条件下, 其变形随时间的增长而增加的现象, 它是钢筋混凝土工程结构与施工中都不容回避的问题^[1-4]。徐变使得钢筋再生混凝土梁在实际服役中大都存在不同程度的控制截面变形随时间的增长有较大增加和截面屈服的问题, 这一现象的存在加剧了钢筋再生混凝土梁服役性能的劣化。已有的研究成果表明^[5-7], 再生骨料混凝土比天然骨料混凝土存在更大的受压徐变性, 在一定持续受压荷载作用下再生骨料混凝土可能会发生突然破坏。目前, 再生骨料作为绿色建筑材料既可以弥补土木工程天然石料的不足, 又可以有效解决建筑垃圾对环境的污染^[8-10], 从而使得钢筋再生混凝土结构在我国土木工程建筑中的应用愈来愈广泛。徐变是导致再生混凝土结构性能退化主要因素之一, 对再生混凝土结构的使用寿命有较大的影响。因此, 研究钢筋再生混凝土梁徐变性能及其设计方法具有重要的现实价值。目前, 相关再生混凝土结构方面的研究主要集中在再生混凝土材料及再生混凝土梁承载力试验研究及理论分析上, 而再生混凝土梁徐变性能的相关研究还较少。本文通过 1 组 3 根再生混凝土梁试件的承载性能试验及 3 组 9 根再生混凝土梁试件的徐变性能试验, 分析了时间、加荷幅值、初始变形因素对再生混凝土梁徐变性能的影响, 基于再生混凝土梁徐变前后承载性能的试验结果, 揭示徐变性能对再生混凝土梁承载性能的影响规律。

1 试验概况

1.1 试验材料

再生混凝土的配制中, 粗骨料采用邯郸市建筑物拆迁所产生的废弃混凝土(经检测废弃混凝土的

^{*} 收稿日期: 2013-12-17; 修订日期: 2014-05-02

基金项目: 河北省自然科学基金(E2010001034)资助

通讯作者: 王小学(1967—), 女, 硕士, 副教授。主要从事结构损伤计算与分析研究。E-mail: wx3812@163.com

强度等级为 C30), 经分选、破碎等加工工艺而制成的再生粗骨料(连续颗粒级配, 粗骨料粒径为 5~15mm, 表观密度为 $2476\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、30min 吸水率为 10.26%、针片状颗粒含量为 5.8%、压碎指标为 13.8%); 水泥采用新峰水泥厂生产的 42.5R 普通硅酸盐水泥; 细骨料采用天然河砂, 含泥量为 1.3%, 吸水率为 1.63%, 细度模数为 2.6, 表观密度为 $2510\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 堆积密度为 $1506\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 减水剂采用苏博特公司产 JM-PCA 混凝土超塑化剂; 粉煤灰采用邯郸电厂生产的 I 级粉煤灰; 拌和水采用邯郸市饮用自来水。

再生混凝土(再生粗骨料取代率 100%)配制强度等级为 C25, 坍落度为 90mm。再生混凝土梁试件纵向受拉钢筋采用 HRB335 螺纹钢筋($\phi 12$, 屈服强度为 403.6MPa, 极限强度为 516.2MPa)。

1.2 试件设计与试验方法

试验中共浇注了 12 根尺寸均为 $100\text{mm} \times 150\text{mm} \times 3000\text{mm}$ 的钢筋再生混凝土矩形截面梁试件, 其中 3 根作为承载性能试验梁试件, 另外 9 根作为徐变性能试验梁试件。梁试件的下部受拉钢筋配置 2 $\phi 12\text{mm}$ 的 II 级螺纹钢筋, 保护层厚度取 25mm, 上部架立筋配置 2 根 I 级 6 光圆钢筋, 箍筋采用 I 级光圆钢筋($\phi 6@120$)。梁试件浇注完成后在其上覆盖塑料薄膜, 在 2d 后拆模并自然养护 28d。养护完成后, 将 9 根试验梁放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(60 \pm 5)\%$ 的恒温恒湿室中进行徐变性能试验; 另外 3 根梁试件进行承载性能试验。徐变实验前在徐变梁试件的跨中截面下沿中部布置 1 个标距为 80mm 的应变测量点以测量下沿应变的变化, 同时在徐变梁试件的跨中截面处以及两支座截面处各布置一个高精度位移计以测量跨中和支座的位移(详见图 1 所示)。

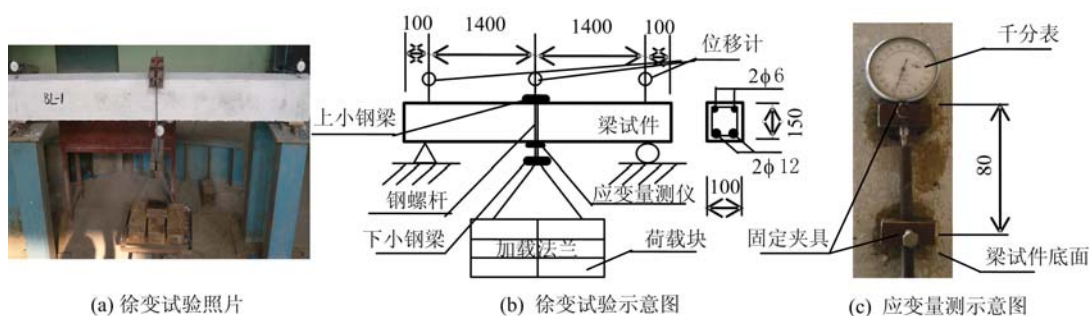


图 1 徐变加载与量测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of loading and measuring in creep experiment

1.3 加载方案

徐变试验中对再生混凝土梁试件采用简支方式, 并在梁试件跨中上部施加一个垂直的集中荷载(详见图 1 所示)。为了满足再生混凝土梁试件徐变试验的加载要求, 加载装置采用 2 根钢螺杆分别置于梁试件的两侧并与跨中顶部加载小钢梁和下部加载小钢梁相连接, 4 根钢绞线上端通过预留孔与下部加载钢梁相连接, 下端与加载法兰相连接。加载重物选用铸铁荷载块。加载前先称量需放置于梁试件顶部的加载小钢梁和下部的加载小钢梁(q_1)、4 根钢绞线(q_2)及加载法兰的荷载值(q_3), 再将称好的铸铁荷载块(q_4)堆放于加载法兰内, 并使 $q_1 + q_2 + q_3 + q_4$ 等于需对梁试件施加的设定荷载水平(F_d)。

1.4 施加荷载水平与试验过程

考虑到钢筋再生混凝土梁徐变的影响, 对试验梁的加载水平进行了限制, 在此取施加的最大荷载不超过其极限荷载的 50%。结合试验条件, 各组试件的极限荷载由 AL 组试件的承载性能试验确定, 取 3 个试件的极限荷载平均值作为该组试件的极限荷载值。BL、CL 和 DL 组分别采用 35%、40% 和 45% 极限荷载的加荷水平, 具体加载情况见表 1 所示。

钢筋再生混凝土梁试件徐变试验中, 第 1 次测读时间为加荷后 0.5h, 然后在 24h、48h、7d 对各个测量点进行 1 次测读, 第 7d 以后每间隔 5d 对各个测量点进行 1 次测读, 当试验达到 360d 时终止试验。试验结束后, 应注意缓慢卸载, 并在卸载后 0.5h 时测读各组梁试件卸载后的残余应变值和残余挠度值。

表 1 梁试件施加荷载
Tab. 1 Loading of beam specimens

分组编号	极限荷载平均值 $\overline{F_u}$ (kN)	分组编号	施加荷载 F_u (kN)	加载幅值 ($\overline{F_u}\%$)
AL	19.53	BL	6.84	35
		CL	7.81	40
		DL	8.80	45

2 试验结果与分析

2.1 徐变试验结果与分析

对 BL、CL 和 DL 组钢筋再生混凝土梁试件均进行了 360d 的徐变试验,试验结果显示徐变应变、徐变挠度均趋于稳定,各组的 3 个再生混凝土梁试件的初始应变和初始挠度(即为徐变荷载加载结束 0.5h 时测得的梁试件跨中截面下翼缘再生混凝土材料应变值和竖向位移值)的离散性不大。梁试件应变及挠度值随时间的增长而增大的现象较为明显,可见梁试件的徐变现象是显著的。各组梁试件的初始应变、总徐变应变、初始挠度、总徐变挠度、残余应变、残余挠度的实测结果详见表 2 所示。

表 2 梁试件徐变实测结果
Tab. 2 Results of creep experiment of flexural beam specimens

梁试件 分组编号	初始应变 $\epsilon_0 (10^{-6})$	总应变 $\epsilon_{360} (10^{-6})$	徐变应变 $\epsilon_{360} (10^{-6})$	残余应变 $\epsilon_r (10^{-6})$	初始挠度 f_0 (mm)	总挠度 f_{360} (mm)	徐变挠度 f_{360} (mm)	残余挠度 f_r (mm)
BL	419	584	165	127	2.02	2.86	0.84	0.62
CL	474	669	185	165	2.37	3.43	1.06	1.09
DL	556	770	204	201	2.53	4.11	1.58	1.74

2.1.1 梁试件的徐变—时间演化关系

表 3 为钢筋再生混凝土梁试件在特定时间点徐变完成比例,由表 3 可以看出,在施加载荷后的短时间内,各组梁试件的徐变应变和徐变挠度均发展较快,施加载荷 1d 后,DL 梁试件分别完成总徐变应变量的 45%左右和总徐变挠度量的 56%左右;7d 后分别完成总徐变应变量的 54%左右和总徐变挠度量的 64%左右;180d 后分别完成总徐变应变量的 84%左右和总徐变挠度量的 85%左右;在施加载荷的后期,各组梁试件徐变应变和徐变挠度的发展均明显变缓,360d 后应变值与挠度值均基本上趋于平稳,DL 梁试件总徐变应变占初始应变的 38%左右,总徐变挠度占初始挠度的 62%左右。图 2 和图 3 分别为各试件徐变应变—时间关系曲线及徐变挠度—时间关系曲线,其中纵坐标为特定点徐变量与总徐变的比值,横坐标为时间。由图 2 和图 3 可以看到,7d 前各梁试件徐变应变—时间关系曲线、徐变挠度—时间关系曲线均上升较快,7d 后开始变缓,最终均逐渐接近为水平线。

表 3 梁试件不同时间点徐变完成比例
Tab. 3 Ratio of creep of beam specimens at different time

梁试件 分组编号	徐变完成比例 (%)											
	徐变应变						徐变挠度					
	1d	7d	90d	180d	260d	360d	1d	7d	90d	180d	260d	360d
DL	45.1	54.5	75.1	84.3	91.2	93.4	56.3	64.4	79.2	85.1	89.2	90.6
CL	40.5	50.2	69.5	77.9	85.4	86.6	53.5	60.2	69.7	77.9	81.7	86.2
BL	36.1	44.3	65.2	71.6	78.3	80.4	48.9	58.7	67.0	72.0	80.9	84.7

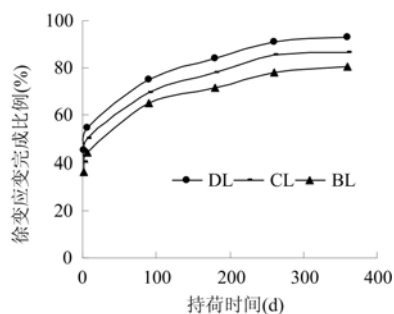


图 2 徐变应变—时间关系曲线

Fig. 2 Curves of creep strain-time

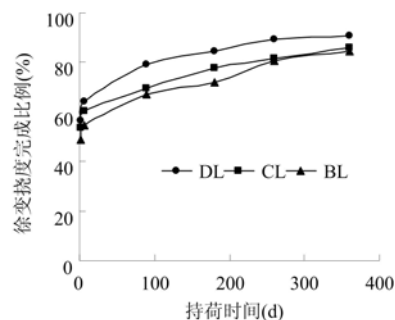


图 3 徐变挠度—时间关系曲线

Fig. 3 Curves of creep deflection-time

2.1.2 加荷幅值对梁试件徐变变形的影响

对比分析 BL、CL 与 DL 三组梁试件徐变试验结果(见表 2)可以看出,加荷幅值为 $45\% \overline{F_u}$ 的 DL 组中,梁试件的最终总徐变应变和总徐变挠度均大于 $35\% \overline{F_u}$ 和 $40\% \overline{F_u}$ 组梁试件的总徐变应变和总徐变挠度,可见加荷幅值越大,梁试件的总徐变应变和总徐变挠度也越大。但加荷幅值为 $45\% \overline{F_u}$ 组梁试件总徐变应变与初始应变的比例以及总徐变挠度与初始挠度的比例均小于加荷幅值为 $35\% \overline{F_u}$ 和 $40\% \overline{F_u}$ 组的梁试件,可见梁试件的徐变与加荷幅值呈现为非线性关系。另外,由表 3 可知,加荷幅值为 $45\% \overline{F_u}$ 组梁试件在特定时刻完成的徐变量占总徐变的比例高于 $40\% \overline{F_u}$ 和 $35\% \overline{F_u}$ 组梁试件,表明加荷幅值越大,完成徐变速度也就越快,对早期徐变速率影响也更为显著。

2.1.3 梁试件徐变后的残余变形

卸除外部作用荷载后的钢筋再生混凝土梁试件还存在一定程度的残余变形(残余应变、残余挠度),残余变形的实测结果详见表 2 所示。表 2 数据表明,残余应变(或残余挠度)与徐变发展情况关系密切,梁试件的总徐变越大,其残余应变(或残余挠度)也越大。

2.1.4 初始变形对梁试件徐变变形的影响

图 4 和图 5 分别为初始应变—徐变应变关系曲线与初始挠度—徐变挠度关系曲线。由图 4 和图 5 可以看出,初始应变(或初始挠度)较大的 DL 组梁试件的总徐变应变(或徐变挠度)也较大。可见初始应变(或初始挠度)越大,受弯梁试件的总徐变应变(或徐变挠度)也越大。

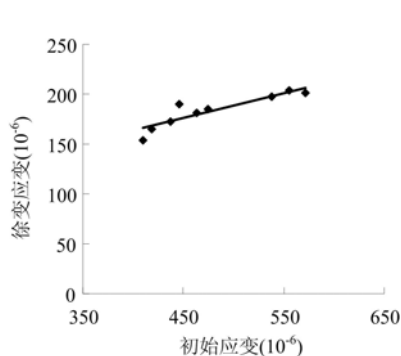


图 4 初始应变—徐变应变关系曲线

Fig. 4 Curves of creep strain-initial strain

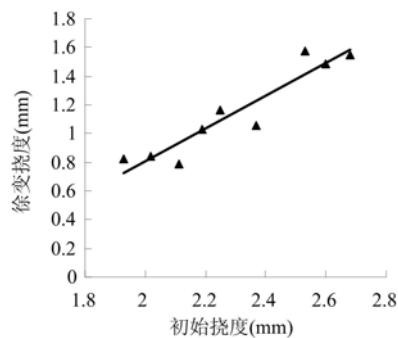


图 5 初始挠度—徐变挠度关系曲线

Fig. 5 Curves of creep deflection-initial deflection

2.1.5 钢筋再生混凝土梁徐变变形机理分析

再生混凝土中的再生粗骨料可视为粘弹性体,在持续荷载作用下新水泥浆胶体内的吸附水析出及水泥浆胶体粒子发生相对滑移、错动,同时部分旧水泥砂浆胶结体由于存在缺陷或应力集中,当损伤累积达到一定程度时,将会引发其脆性破坏,使得再生混凝土发生受拉(或受压)徐变应变^[5]。再生混凝土徐变应变的逐渐增大会进一步导致梁试件变形曲率的增加,从而引起梁试件徐变挠度的进一步增

大^[1]。由于再生混凝土这一徐变特性的存在,使得再生混凝土梁在应力水平远低于其极限应力水平的情况下,发生由徐变损伤累积导致的破坏。另外,再生混凝土梁底部纵向受拉钢筋与水泥砂浆胶结材料的粘弹性表现为在加载过程其应变相对钢筋滞后;卸载过程中梁试件的应变和挠度恢复同样具有时间效应,同时也存在不可恢复的残余应变和残余挠度。

2.2 徐变前后材料性能试验结果与分析

在徐变试验结束后,对 BL、CL 和 DL 组梁试件进行承载性能试验,试验结果见表 4 和图 6 所示。

表 4 梁试件徐变前后的屈服荷载与极限荷载试验结果

Tab. 4 Cracking-load and ultimate-load of beam specimens before and after creep test

分组 编号	平均屈服荷载 (kN)	平均极限荷载 (kN)	试件 编号	平均屈服荷载 (kN)	徐变后变化 (%)	平均极限荷载 (kN)	徐变后变化 (%)
AL	11.3	19.5	BL	10.6	6.2	18.4	5.6
			CL	9.8	13.3	17.5	10.2
			DL	8.7	23.0	16.1	17.4

由表 4 可以看出,梁试件经历了徐变试验之后,试件的屈服荷载、极限荷载均有显著下降,最大降幅达 23.0%,且呈现总徐变变形越大,屈服荷载、极限荷载降幅越大的趋势。由于残余徐变变形的存在,试件的静力极限变形也有所降低,表明徐变变形导致试件的脆性程度增加,延性降低。徐变过程中,试件承受恒定载荷的作用,吸收能量产生无法恢复的残余变形,从而使得再生混凝土材料内部微裂缝的发育与扩展,并最终表现为梁试件总累积变形量的增加和承载性能的降低。

由图 6 可看出,没有经历徐变变形过程的 AL 组梁试件和经历了徐变变形过程的 BL、CL 和 DL 组梁试件在荷载—变形关系曲线的变化规律上基本上是一致的,都是以梁试件屈服点为界限,可划分为两个基本阶段。屈服点之前梁试件处于线性发展阶段,梁试件的荷载—变形关系呈线性增长,荷载—变形关系基本重合;屈服点以后,梁试件的荷载—变形关系则表现为非线性变化。

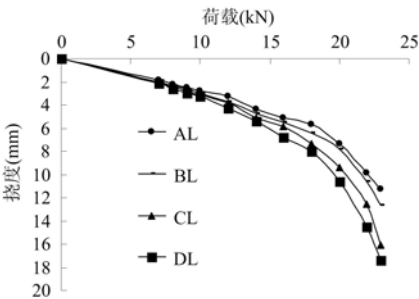


图 6 试件徐变前后荷载—挠度关系曲线
Fig. 6 Curves of load-deflection before and after

3 结论

本文通过钢筋再生混凝土梁试件徐变试验研究,得到以下结论:

- (1) 钢筋再生混凝土梁在持续载荷作用下,受弯徐变变形现象显著,且徐变变形在持荷前期发展较快,持荷后期逐渐变缓,前 7d 完成的徐变量占总徐变量的一半以上,360d 后徐变变形基本上趋于稳定。
- (2) 加荷幅值、初始变形等因素对钢筋再生混凝土梁的徐变变形有较为显著的影响,加荷的幅值越大,初始变形也就越大,总徐变变形也随之增加。各组经历了徐变过程的钢筋再生混凝土梁卸荷后均存在一定程度的残余变形。
- (3) 钢筋再生混凝土梁经历徐变试验后,其屈服荷载、极限荷载均有一定程度的下降,表现为其总徐变变形越大,下降的幅度也就越大。经历徐变过程后的钢筋再生混凝土梁,其脆性程度略有增加,延性略有降低。

参考文献:

[1] Paulson K A, Nilsson A H, Hover K C. Long-term deflection of high-strength concrete beams [J]. ACI Material Journal, 1991, 88(2):197—206.
[2] Bakoss S L, Gilbert R I, Faulkes K A. Long-term deflections of reinforced concrete beams [J]. Magazine of

- Concrete Research, 1982, 34(121): 203—212.
- [3] 张运涛, 孟少平, 潘钻峰. 高强混凝土徐变力学实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(6):592—597 (ZHANG Yuntao, MENG Shao-ping, PAN Zuan-feng. Experimental study of creep mechanics for high strength concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(6):592—597 (in Chinese))
- [4] Neville A M, Dilger W H, Brooks J J. Creep of plain and structural concrete [M]. New York: Construction Press, 1983.
- [5] Domingo-Cabo A, Lazaro C, Lopez-Gayarre F, et al. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(7): 2545—2553.
- [6] 肖建庄, 范玉辉. 再生混凝土徐变试验及机理的模型化分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(4):18—24 (XIAO Jian-zhuang, FAN Yu-hui. Experiment and mechanism modeling analysis on creep of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(4):18—24 (in Chinese))
- [7] 邹超英, 王勇, 胡琼. 再生混凝土徐变度试验研究及模型预测[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2):94—98 (ZOU Chao-ying, WANG Yong, HU Qiong. Experimental study and model predictive of recycled aggregate concrete creep [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2):94—98 (in Chinese))
- [8] 姚武. 绿色混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006 (YAO Wu. Green Concrete [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006(in Chinese))
- [9] Etaeberria M, Vazquez Mari, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2007(37):735—742.
- [10] Topcu I B. Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(12): 18—23.
- [11] 潘立本, 刘雁. 钢筋混凝土梁长期荷载作用下的非线性变形[J]. 建筑结构, 1997, 27(7):10—14 (PAN Liben, LIU Yan. Non-linear deflections of reinforced concrete beams under lon-term loads [J]. Building Strucyure, 1997, 27(7):10—14 (in Chinese))

Experimental Investigation on Creep Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beam

AN Xin-zheng, WANG Xiao-xue

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: To reveal the creep behavior of reinforced recycled concrete beam, creep (creep strain and creep deflection) comparative experiments for 9 reinforced recycled concrete beam specimens under 3 loading levels were carried out. The correlation between creep of reinforced recycled concrete beam and time was analyzed; the influence of loading amplitude and initial deformation (initial strain and initial deflection) on the creep behavior of reinforced recycled concrete beam was investigated; the creep mechanism of reinforced recycled concrete beam was revealed. Experimental results manifest that the total creep deflection is about 62% of initial deflection when beam specimen is subjected to a constant load level equivalent of 45% of ultimate load. Creep deflection increases faster in the early period of experiment. In 7 days, it has reached 64% of ultimate creep deflection value of the beam specimen; then the increase slows down. Creep strain and creep deflection increase with the increases of loading amplitude and initial deformation. Load bearing capacity of beam specimen decreases after experiencing creep, the decrease amplitude increases with the increases of the total creep strain and the total creep deflection.

Keywords: recycled concrete; reinforced recycled concrete beam; creep; load bearing capacity; experimental investigation