

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.128



# 废弃纤维再生混凝土受压徐变及预测模型

周静海<sup>a</sup>, 吴迪<sup>a</sup>, 赵庭钰<sup>a</sup>, 郭易奇<sup>b</sup>

(沈阳建筑大学 a. 土木工程学院; b. 建筑设计研究院, 沈阳 110168)

**摘要:**为研究再生粗骨料替代率、废弃纤维体积掺入量对废弃纤维再生混凝土受压徐变破坏时间、徐变变形和徐变度的影响规律,对普通混凝土、再生混凝土和废弃纤维再生混凝土试件在实验室条件下进行了85%、90%和95%应力水平的徐变试验。试验结果表明:随着再生粗骨料替代率的增加,徐变破坏的时间缩短、徐变变形及徐变度增大;随着废弃纤维体积掺入量的增加,徐变变形及徐变度减小,徐变破坏时间增加。废弃纤维的加入能有效缓解再生混凝土受压徐变的破坏程度。在考虑再生粗骨料替代率及废弃纤维体积掺入量的基础上,对ACI209R徐变预测模型进行修正,模型预测结果与试验值吻合较好。

**关键词:**废弃纤维;再生混凝土;高应力;徐变破坏;徐变预测模型

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0143-09

## Pressure and creep characteristics of waste fiber recycled concrete and estimation model

Zhou Jinghai<sup>a</sup>, Wu Di<sup>a</sup>, Zhao Tingyu<sup>a</sup>, Guo Yiqi<sup>b</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Architectural Design and Research Institute, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the effect of the replacement ratio of recycled coarse aggregates and the volume of waste fibers on the creep failure time, creep deformation and creep of waste fiber recycled concrete, a group of ordinary concrete and 4 groups of waste fiber recycled concrete specimens creep tests at 85%, 90% and 95% stress levels were carried out under laboratory conditions. The test results showed that with the increase of the replacement rate of recycled coarse aggregate, the time of creep failure, the creep deformation and the creep degree increase; with the increase of the volume of waste fibers, the creep deformation and creep degree decrease, the time of creep failure increases. The addition of waste fibers can effectively alleviate the degree of compression and creep damage of recycled concrete. The ACI209R creep prediction model was modified based on the replacement rate of recycled coarse aggregate and the volume of waste fiber. The model prediction results were in good agreement with the experimental values.

**Keywords:** waste fiber; recycled concrete; high stress; creep damage; creep estimation model

中国每年会产生大量建筑垃圾,如何有效处理这些建筑垃圾已成为亟待解决的问题<sup>[1]</sup>。具有造价

低、节约资源等优势及显著经济与社会效益的再生混凝土无疑是克服传统处理方式缺点、实现资源可

收稿日期:2019-07-02

基金项目:国家自然科学基金(51678374)

作者简介:周静海(1965-),男,教授,博士,主要从事废弃纤维再生混凝土研究,E-mail:476088880@qq.com。

Received:2019-07-02

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51678374)

Author brief: Zhou Jinghai (1965-), professor, PhD, main research interest: waste fiber recycled concrete, E-mail: 476088880@qq.com.

持续利用的有效方法<sup>[2]</sup>。但随着对再生混凝土研究的深入,再生骨料孔隙率大、早期裂纹多等问题相继暴露<sup>[3]</sup>,这就使得再生混凝土体积稳定性较普通混凝土差,更易开裂<sup>[4-5]</sup>。而废弃纤维具有质轻、吸水率低和耐酸碱性好等特点,可显著减小再生混凝土内部微裂缝的数量、长度和宽度,使混凝土的抗渗性能得到明显改善,因此,废弃纤维再生混凝土便应运而生<sup>[6]</sup>。

学者们已对再生混凝土长期徐变性能开展了大量工作,一般认为,再生骨料替代率增加,再生混凝土的徐变也随之增加<sup>[7]</sup>,Domingo-Cabo等<sup>[8]</sup>通过试验研究得到了相同的结论,在90 d的徐变试验中,再生粗骨料取代率为50%和100%的再生混凝土较基准混凝土的徐变变形增长25%和62%。Geng等<sup>[9]</sup>等对40个再生粗骨料取代率为100%的再生混凝土柱进行8个月的长期荷载作用后,表明再生混凝土柱的徐变变形比普通混凝土柱大50%~120%。曹万林等<sup>[10]</sup>对6根再生混凝土足尺梁进行了750 d的长期稳定加载,发现随着再生粗骨料取代率的增加,再生混凝土梁的徐变系数初期增长趋势一致,但随着时间的推移,后期的差异会逐渐变大。Ravindrarajah等<sup>[11]</sup>研究发现,再生混凝土的徐变变形与水灰比呈正比关系,再生骨料表面附着的老旧水泥砂浆是再生混凝土徐变变形大的主要原因。肖建庄等<sup>[12]</sup>通过试验证明,再生混凝土加载时的龄期越早则徐变值越大。罗素蓉等<sup>[13]</sup>通过试验得出如果用预处理过的高品质再生骨料拌制而成的再生混凝土进行徐变试验,则其徐变变形会明显减小。肖建庄等<sup>[14]</sup>研究发现,再生混凝土所受荷载的应力水平越高,徐变增加越快,且持荷应力比超过0.4后,其徐变增长会表现出明显的非线性。

掺合料及纤维可以改善混凝土的徐变性能。大量的试验证明掺加粉煤灰后,混凝土的徐变性能发生了很大的改变,通常情况下,粉煤灰混凝土的徐变小于普通混凝土<sup>[15]</sup>。Castel等<sup>[16]</sup>通过试验证明在再生混凝土中掺入矿渣等矿物掺合料也可以明显降低其徐变度。周静海等<sup>[17]</sup>通过非金属超声检测仪测定技术研究了废弃纤维再生混凝土在长期荷载下的徐变,在加载初期,混凝土损伤发展的速率较快,损伤变量会随着再生粗骨料取代率的增大而增大,在再生混凝土中添加废弃纤维可以增强混凝土承受损伤的能力。于俊超<sup>[18]</sup>对比研究各种工程纤维混凝土加载后的徐变性能发现,弹性模量低于基准混凝土的工程纤维对于混凝土徐变性能不但没有抑制作用,还会增

加其内部缺陷,增大混凝土的徐变变形。而弹性模量远大于基准混凝土的工程纤维则可以抑制混凝土徐变,但掺量过大时,工程纤维与基体之间大量增加的界面层会减弱纤维对徐变的抑制作用。

分析长期荷载作用下结构的应力、应变、裂缝、破坏和屈曲等问题,必须考虑徐变的作用和影响。尽管学者们对于混凝土的徐变性能做了大量的研究,但对于废弃纤维再生混凝土的徐变研究尚少。本文设计了5组试件,通过其高应力持续作用下的徐变试验,分别研究再生粗骨料替代率、废弃纤维体积掺入量以及应力水平对废弃纤维再生混凝土抗压徐变的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

1.1.1 试验材料 水泥选用P.O42.5普通硅酸盐水泥。细骨料为天然中砂。水为沈阳建筑大学自来水。试验所用粗骨料分为两种,一种是从骨料厂购置的天然粗骨料,一种是再生粗骨料。

表1 再生粗骨料基本性能

Table 1 Basic performance of recycled coarse aggregates

表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	吸水率/ ( $\% \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ )	压碎 指标/ $\%$	残浆 含量/ $\%$
2 550	0.322	14.6	27

再生粗骨料由沈阳建筑大学结构实验室里初始强度为C40的废弃混凝土构件,经过人工破碎、清洗、筛分等一系列流程所制成。根据《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)<sup>[19]</sup>规范标准,测得再生粗骨料的各项基本性能见表1。试验的再生粗骨料性能符合《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)<sup>[20]</sup>规范标准。

废弃纤维来自废旧丙纶地毯,材质为聚丙烯纤维,经过人工拆分,裁剪成长度为19 mm的纤维段,作为增强纤维掺入混凝土中,如图1所示。纤维的密度为 $0.91 \text{ g/cm}^3$ ,直径 $30 \mu\text{m}$ ,极限伸长率为15%~25%,弹性模量为 $3.79 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ,吸水率小于1%,耐酸碱性好<sup>[21]</sup>。

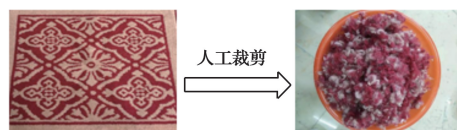


图1 废弃纤维

Fig. 1 Waste fibers

1.1.2 配合比 根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)<sup>[22]</sup>的有关规定,设计尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试块。共分 5 组,其中第 1 组为普通混凝土试件,其他 4 组为废弃纤维再生混凝土试件。

因为再生粗骨料表面附着大量的老旧砂浆,而且本身也存在着在制备过程中产生的微裂缝,所以孔隙率和吸水率会变高。若是按照普通混凝土的配合比来制备再生混凝土,会降低有效水灰比,故在拌

制再生混凝土时需加入附加水,各试件的配合比列于表 2 中,其中,NC 为普通混凝土试件,RCA 为再生粗骨料替代率为 A% 的再生混凝土试件,FRCA-B 为再生粗骨料替代率为 A%,废弃纤维体积掺入量为 B% 的废弃纤维再生混凝土试件。试验利用强制式搅拌机拌制混凝土,采用干拌法制备废弃纤维再生混凝土<sup>[21]</sup>,先将水泥与砂搅拌均匀后将废弃纤维分散投入,搅拌 1 min,使其在拌合物中均匀分布,加水继续搅拌 1 min 至水泥砂浆均匀,最后投入粗骨料拌制 2~3 min。

表 2 配合比

Table 2 Mixture ratio

编号	再生粗骨料 替代量/%	废弃纤维体积 掺入量/%	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂子/ (kg·m <sup>-3</sup> )	天然骨料/ (kg·m <sup>-3</sup> )	再生粗骨料/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )
NC	0	0	390	709	1156	0	195
RC50	50	0	390	709	578	578	195+10
RC100	100	0	390	709	0	1156	195+20
FRC50-0.08	50	0.08	390	709	578	578	195+10
FRC50-0.12	50	0.12	390	709	578	578	195+10

2.1.3 废弃纤维再生混凝土力学性能 进行了废弃纤维再生混凝土的基本力学性能试验,混凝土抗压强度试验和静力受压弹性模量试验均按照规范《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)<sup>[23]</sup>进行。立方体抗压强度试验选用 150 mm×150 mm×150 mm 的标准试件;轴心抗压强度试验和静力受压弹性模量试验选用 150 mm×150 mm×300 mm 的标准试件。废弃纤维再生混凝土抗压强度和弹性模量试验结果列于表 3、表 4 中。

表 3 废弃纤维再生混凝土立方体抗压强度

Table 3 Cube compressive strength of waste fiber recycled concrete

试件编号	破坏荷载/kN			破坏荷载 平均值/kN	抗压强度 平均值/MPa
	1#	2#	3#		
NC	708.4	926.8	913.6	913.6	40.6
RC50	880.8	823.2	838.4	847.5	37.7
FRC50-0.08	810.8	914.0	833.6	852.8	37.9
FRC50-0.12	901.7	855.2	856.8	871.2	38.7
RC100	870.2	812.0	804.8	829.0	36.8

## 1.2 试验加载设计

试验分为 3 组,进行高应力作用下的徐变试验。85% 应力水平下的徐变破坏试验,选择 32 t 螺旋式机械千斤顶作为长期持荷装置,用螺栓固定横钢梁

表 4 废弃纤维再生混凝土轴心抗压强度及弹性模量

Table 4 Axial compressive strength and elastic modulus of waste fiber recycled concrete

试件编号	破坏荷载/kN			破坏荷载 平均值/kN	抗压强度 平均值/MPa	弹性模 量/GPa
	1#	2#	3#			
NC	655.2	572.6	666.4	631.4	28.1	35.3
RC50	596.0	524.4	531.2	550.5	24.5	32.3
FRC50-0.08	571.6	468.4	556.0	556.0	24.7	32.1
FRC50-0.12	674.4	587.2	541.2	601.0	26.7	31.0
RC100	527.6	418.8	557.6	527.6	23.4	29.4

以承受荷载的反力,试验装置如图 2 所示。正式加载前,先用千斤顶加至预加荷载的 20%,同时,观测设置在试件两侧的应变读数的变化,如两侧的应变均不大于平均值的 10%,表示试件受荷均匀,否则,重新调整对中,再次重复以上步骤,直至读数符合要求。对中完毕后,继续加荷,直到加至预加荷载,随后保持荷载不变。

90%、95% 应力水平下采用反力架、50 t 螺旋式千斤顶进行试验,试验装置如图 3 所示,预加载方式与 85% 应力水平下相同。荷载受荷均匀后,保持荷载恒定不变,当力传感器的读数小于所需荷载的 2% 时,应进行补载,直至试件发生徐变破坏。观察破坏状态,记录徐变破坏曲线以及破坏时间。

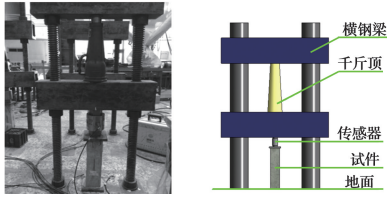


图 2 85%应力水平下徐变装置及示意图

Fig. 2 Creep device under 85% stress level and schematic diagram

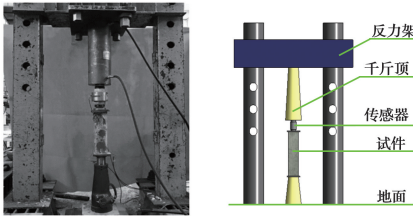


图 3 90%和 95%应力水平下徐变装置及示意图

Fig. 3 Creep device under 90% and 95% stress level and schematic diagram

## 2 试验结果与分析

### 2.1 85%应力水平下徐变试验结果与分析

在进行徐变试验前,首先进行 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体极限抗压强度试验,以确定每组徐变试验的持荷应力。棱柱体极限抗压强度试验按照规范《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016)进行,每组取 3 个试块,取其平均值作为棱柱体极限抗压强度值,若所测得的最大值或最小值中的一个与中间值之差的绝对值大于中间值的 15%,取中间值。废弃纤维再生混凝土试件的抗压强度试验结果如图 4 所示。废弃纤维再生混凝土棱柱体的轴心抗压强度会随着再生粗骨料替代率的增大而降低,随着废弃纤维体积掺入量的增多而增强;在混凝土中掺入再生粗骨料和废弃纤维会降低混凝土的弹性模量,但降低程度不大。

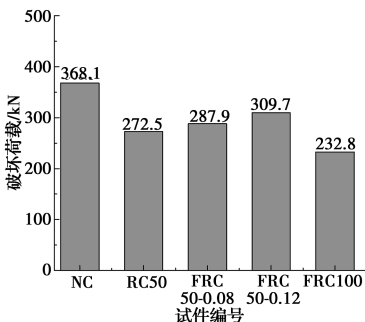


图 4 废弃纤维再生混凝土棱柱体抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of recycled fiber concrete prism

85%应力水平下,试验龄期 60 d 的徐变变形如图 5 所示,徐变度如图 6 所示。其中,徐变度是单位应力作用下所发生的徐变应变。85%应力水平下徐变变形及徐变度均为每组 3 个试件进行徐变试验后的平均值。

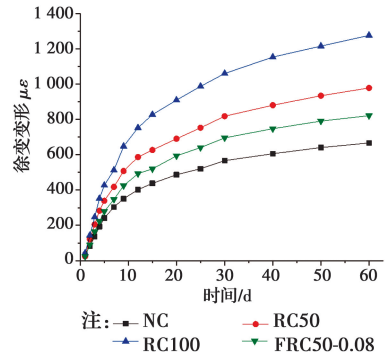


图 5 各试件的徐变变形曲线

Fig. 5 Creep deformation of Specimens

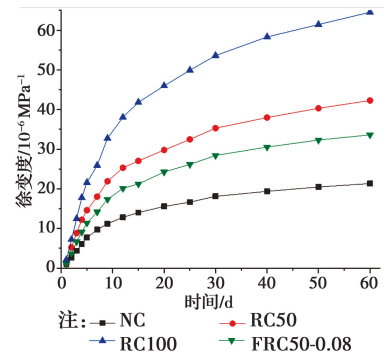


图 6 各试件的徐变度对比

Fig. 6 Creep degree of Specimens

由图 5 可知,随着再生粗骨料替代率的增加,徐变变形增大。徐变现象是由于混凝土内部微裂缝的不断产生和扩展所致,而再生粗骨料在回收破碎的过程中,会产生一些内部损伤和微裂纹且再生粗骨料与水泥浆体的界面过渡区较为薄弱,在高应力作用下很容易使界面和砂浆内产生微裂缝,使再生混凝土产生较大的徐变变形。在再生混凝土中掺入废弃纤维能够降低其徐变变形。

由图 6 可知,85%应力水平下,RC50、FRC50-0.08与 NC 徐变度变化曲线基本平行,而 RC100 的徐变度变化曲线则偏离前三者距离较远,徐变度增加的速度显著加快,非线性关系明显,说明当再生粗骨料替代率提升至 100%时,再生粗骨料本身的微裂缝等缺陷会显著的增加混凝土的徐变变形。

### 2.2 90%、95%应力水平试验结果与分析

#### 2.2.1 再生粗骨料取代率 不同再生粗骨料替代



率的混凝土在高应力持续作用下所产生的徐变变形和发生徐变破坏的时间均存在一定差异。90%和95%应力水平下,每组3个混凝土试件在发生徐变破坏前的徐变变形和徐变时间平均值如图7所示。

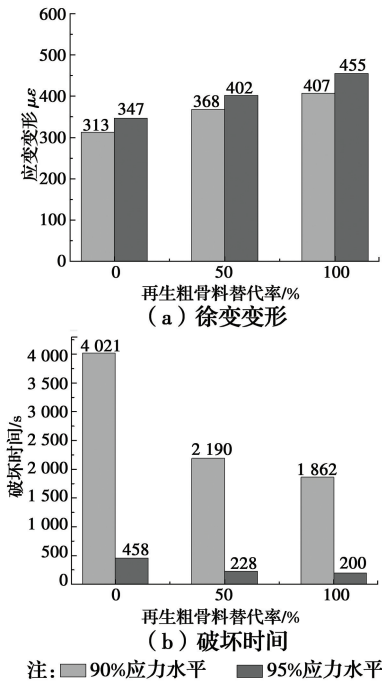


图7 不同再生粗骨料替代率下的徐变性能

Fig. 7 Creep deformation of concrete with different recycled aggregate replacement ratio

由图7(a)可知,在90%应力水平作用下,RC50和RC100同比NC的徐变变形分别增加了17.6%和30%;在95%应力水平作用下,RC50和RC100同比NC的徐变变形分别增加了15.9%和31.1%。说明再生粗骨料替代率越大,再生混凝土的徐变变形越大。

由图7(b)可知,混凝土所处的应力水平越高,发生徐变破坏的时间越短。在90%应力水平下,试件均在持荷几十分钟后才会发生破坏,而在95%应力水平下,试件仅持荷短短几分钟就发生了破坏,仅约为90%应力水平下破坏时间的十分之一。这是由于混凝土所受的荷载越大,其内部微裂缝产生的越多,扩展速度越快。在徐变过程中,徐变损伤起主导地位,使得原有的微裂缝和新增的微裂缝加速扩展并且贯通,从而使发生徐变破坏的时间缩短。

再生混凝土发生徐变破坏的时间较普通混凝土会缩短一倍以上。这是因为在回收废弃混凝土和制造再生粗骨料的过程中,由于损伤的累积导致再生粗骨料表面及内部已存在不同程度的缺陷。而高应

力下的徐变不仅会使再生混凝土中原有的微裂缝扩展,还会产生新的微裂缝与其贯通,形成更大的裂缝。并且再生粗骨料对水泥砂浆的约束刚度不足,从而导致再生混凝土发生徐变破坏的时间大大缩短。

2.2.2 废弃纤维体积掺入量 不同的废弃纤维体积掺入量也会导致混凝土在高应力持续作用下所产生的徐变变形和发生徐变破坏的时间均存在一定差异。90%和95%应力水平下,不同废弃纤维体积掺入量的废弃纤维再生混凝土在发生徐变破坏前的徐变变形和徐变时间均为每组3个试件进行徐变试验后的平均值。

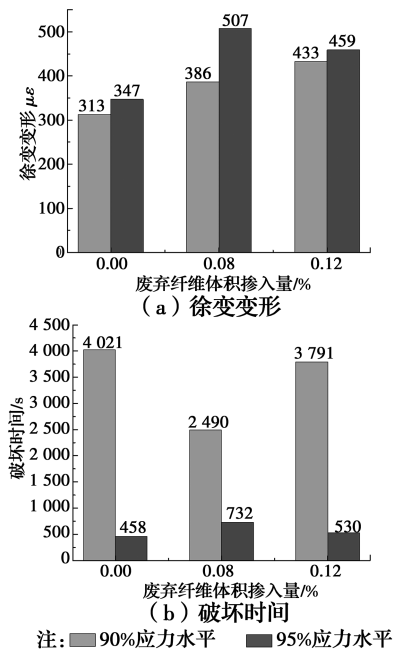


图8 不同废弃纤维体积掺入量下的徐变性能

Fig. 8 Creep deformation of concrete with different waste fiber replacement ratio

由图8(a)可知,在90%应力水平作用下,FRC50-0.08和FRC50-0.12同比RC50的徐变变形分别增加了4.9%和17.7%;在95%应力水平作用下,FRC50-0.08和FRC50-0.12同比RC50的徐变变形分别增加了26.1%和14.2%,再生混凝土中纵横交错的废弃纤维可以一定程度上抑制微裂缝发展,使废弃纤维再生混凝土试件在高应力下的持续变形过程增长,混凝土破坏也由脆性破坏转为塑性破坏。废弃纤维再生混凝土在95%应力水平作用时,FRC50-0.12的徐变变形要低于FRC50-0.08,分析其原因,可能是因为在拌制FRC50-0.12试件时,废弃纤维并没有均匀分布在混凝土中,产生“抱团”

现象,因此,抑制裂缝扩展的效果不明显,或者是由于试件内大量的废弃纤维在较高的应力水平作用下被拉断,失去效用。

由图 8(b)所示,废弃纤维在徐变破坏的发生过程中能够有效地起到抑制破坏的作用,而且在 95% 高应力状态下效果更加显著。废弃纤维均匀地分布在混凝土基体中,可以在徐变过程中起到阻碍混凝土内部微裂纹的产生和发展,提高混凝土的延性,从而使混凝土的徐变破坏时间得到较大的延长。

### 2.3 机理分析

图 9 为再生混凝土的微观形貌,再生混凝土各相间存在明显的界面,区别于普通混凝土,主要包括新旧水泥石界面、原天然骨料与旧水泥石界面和原天然骨料与新水泥石界面。这些界面结构疏松,主要由不定形态的水化产物组成,是裂缝主要生成和扩展的区域。因此,在宏观尺度上表现为在高应力作用下,随着再生粗骨料替代率的增加,再生混凝土的徐变破坏时间减小,徐变变形增加。

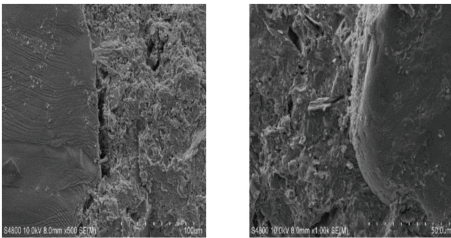


图 9 再生混凝土微观形貌

Fig. 9 Micromorphology of recycled concrete

图 10 为废弃纤维再生混凝土中的废弃纤维微观形貌,可以看到废弃纤维横贯于混凝土裂纹的两侧,为抑制混凝土裂纹的发展提供拉力,改善了再生混凝土的微观结构。再生混凝土在高应力下的徐变是一个微裂缝随时间的增长而不断扩展的过程,而废弃纤维均匀分布在再生混凝土中,使得微裂缝在扩展的过程中受到阻碍,废弃纤维也会凭借其较好的变形能力消耗一部分能量,从而起到阻裂的作用,有效抑制微裂缝的产生和扩展。

## 3 废弃纤维再生混凝土徐变预测模型

### 3.1 混凝土徐变预测模型

目前常用的混凝土徐变预测模型有 ACI209R 模型<sup>[24]</sup>、GL2000 模型<sup>[25]</sup>、CEB-FIP 模型<sup>[26]</sup>等。由于 GL2000 模型及 CEB-FIP(1990)模型比较适合应力水平  $\sigma_c/f_c(t_0) < 0.4$  的混凝土徐变预测,故主要

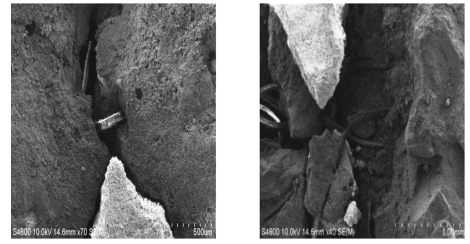


图 10 废弃纤维微观形貌

Fig. 10 Micromorphology of waste fibers

讨论 ACI209R 模型的适用性,并基于试验数据对模型进行修正。

ACI209R 模型

$$\varphi(t, t_0) = \varphi(\infty) \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \quad (1)$$

$$\varphi(\infty) = 2.35k_1k_2k_3k_4k_5k_6 \quad (2)$$

式中: $\varphi(t-t_0)$ 为徐变系数, $t-t_0$ 为持荷时间; $k_1$ 为混凝土加载龄期影响系数, $k_1 = 1.25t_0^{-0.118}$ ,试验中  $t_0$  为 28 d,故  $k_1 = 0.843$ ;  $k_2$  为环境相对湿度  $I_{RH}$  影响系数, $k_2 = 1.27 - 0.0067I_{RH}$ , ( $I_{RH} > 40\%$ ),本试验环境的相对湿度  $I_{RH}$  取 65%,故  $k_2 = 1.265$ ;  $k_3$  为混凝土构件的平均厚度影响系数, $k_3 = 1.10 - 0.000674(v/s)$ ,  $v/s$  为混凝土构件的体表比,试验中试件的体表比为 22.222,故  $k_3 = 1.085$ ;  $k_4$  为混凝土稠度影响系数, $k_4 = 0.82 + 0.00264S$ ,  $S$  为新拌混凝土的坍落度, mm, 试验中新拌混凝土坍落度为 60 mm,故  $k_4 = 0.978$ ;  $k_5$  为细骨料含量影响系数, $k_5 = 0.88 + 0.0024f$ ,  $f$  为细骨料占总骨料的百分率,本试验中细骨料占总骨料的百分率为 38%,故  $k_5 = 0.881$ ;  $k_6 = 0.46 + 0.09A_d \geq 1$ ,  $A_d$  为新拌混凝土中所含空气的体积,按照文献[26]取值,  $k_6 = 0.91$ 。

基于试验中 NC 的弹性模量、抗压强度、试件的体表比及相对环境湿度等各种基本的试验数据,首先计算了 NC 试件的徐变系数,并与通过试验所得到的徐变系数试验值进行对比,见图 11。

由图 11 可见,由于预测模型所考虑的因素与实际试验条件存在差异,导致该模型无法反映废弃纤维再生混凝土的徐变变形,所以,在预测废弃纤维再生混凝土的徐变时,要考虑再生粗骨料替代率和废弃纤维体积掺入量的影响。

### 3.2 修正的 ACI209R 预测模型

对 ACI209R 预测模型进行修正,要考虑再生粗骨料替代率  $r$  和废弃纤维掺量  $w$  对废弃纤维再生混

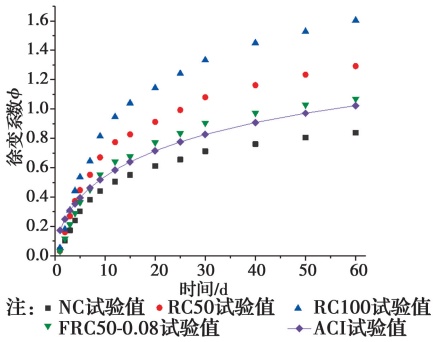


图 11 混凝土徐变系数计算值与试验值对比

Fig. 11 Comparisons of creep coefficient between prediction and test values

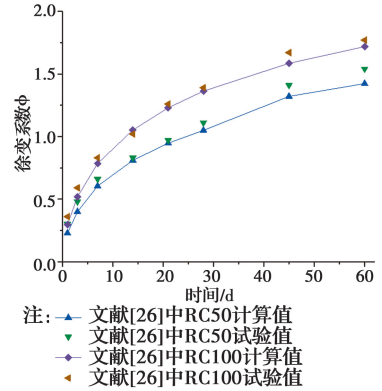


图 13 文献[27]徐变系数计算值与试验值对比

Fig. 13 Comparisons of calculation and test creep coefficient in literature [27]

凝土徐变的影响,对式(2)再乘以系数  $\gamma$  进行修正。根据  $r$  和  $w$  分别为 0, 0; 50%, 0; 100%, 0; 50%, 0.08% 的徐变系数试验值,回归得到  $\gamma$ ,并根据试验数据线性拟合出  $\gamma$  与  $r$ 、 $w$  的关系

$$\gamma = 0.778 + 0.681r - 2.244w \quad (3)$$

由图 12 可见,修正后的 NC、RC50、RC100、RC50-0.08 组试件的徐变系数计算值和试验值在持载 5 d 前有一定偏差,但混凝土徐变是一个长期过程,二者在持载 7 d 之后的曲线基本一致,误差在允许范围内。

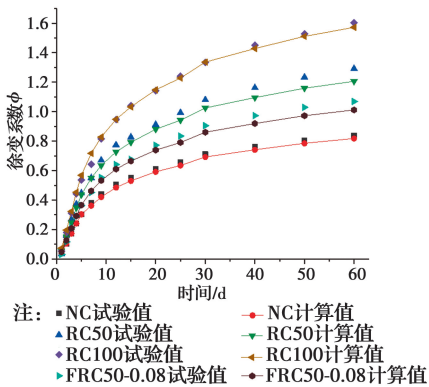


图 12 修正后的混凝土徐变系数计算值与试验值对比

Fig. 12 Comparisons of creep coefficient after modified between prediction and test values

同时,为进一步检验修正后的徐变系数预测模型的精度,利用修正后的模型计算文献[27]中 RC50、RC100 组试件的徐变系数,并与其文中的试验值进行对比,发现二者的结果比较接近,如图 13。对修正后的模型可以较为准确的预测废弃纤维再生混凝土的徐变趋势。

目前,将聚丙烯纤维作为增强材料掺入再生混凝土中研究其徐变性能的文献较少,故在废弃纤维方面仅用试验所得的数据进行拟合。式(3)适用于

由原始强度为 C40 的废弃混凝土破碎后形成的再生粗骨料制备而成的再生混凝土,以及废弃聚丙烯纤维再生混凝土的徐变系数预测。

## 4 结论

1)混凝土在 85% 应力水平下,持荷 60 d 仍未发生徐变破坏。再生混凝土的徐变变形和徐变度要大于普通混凝土,且徐变变形和徐变度随着再生粗骨料替代率的增大而增大;在再生混凝土中掺入体积分数为 0.12% 的废弃纤维能够显著降低混凝土的徐变变形和徐变度。

2)废弃纤维再生混凝土在 90% 和 95% 应力水平下持载会发生徐变破坏现象,在 90% 应力水平下,混凝土均在持荷几十分钟才会发生破坏,在 95% 应力水平下,混凝土仅持荷短短几分钟就发生了破坏,对混凝土所施加的应力水平越大,发生徐变破坏时间越短。高应力水平下持载,添加废弃纤维的再生混凝土试件徐变破坏时间相比未添加废弃纤维的再生混凝土试件有所延长。

3)在 NC、RC50、RC100、RC50-0.08 组试件 85% 应力水平下的徐变试验结果的基础上,对 ACI209R 徐变预测模型进行了修正,修正后的模型中加入的系数  $\gamma$ ,考虑了再生粗骨料替代率和废弃纤维体积掺入量对混凝土徐变的影响,可以较为准确地预测高应力水平下的再生混凝土徐变情况。

## 参考文献:

[1] 方帅,邹桂莲,王华新,等. 国外建筑垃圾资源再利用调查与启示[J]. 公路工程, 2017, 42(5): 154-158,167.

- FANG S, ZOU G L, WANG H X, et al. Investigation and inspiration on the recycling of foreign construction waste [J]. Highway Engineering, 2017, 42(5): 154-158,167. (in Chinese)
- [2] 肖绪文,冯大阔,田伟. 我国建筑垃圾回收利用现状及建议[J]. 施工技术, 2015, 44(10): 6-7.  
XIAO X W, FENG D K, TIAN W. Current status and suggestions on recycling and utilization of construction waste in china (in Chinese) [J]. Construction Technology, 2015, 44(10): 6-7. (in Chinese)
- [3] 薛志龙. 再生骨料对透水混凝土性能的影响及机理研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2018.  
XUE Z L. Effect of recycled aggregate on performance of pervious concrete and its mechanism [D]. Zhangzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018. (in Chinese)
- [4] 王倩,汤小平,徐海群,等. 海水侵蚀环境下再生混凝土的Cl<sup>-</sup>~扩散特性[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(12): 6-9.  
WANG Q, TANG X P, XU H Q, et al. Chloride diffusive characteristic of recycled concrete exposed to sea water[J]. China Concrete and Cement Products, 2017(12): 6-9. (in Chinese)
- [5] 李文贵,龙初,罗智予,等. 再生骨料混凝土破坏机理与改性研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(6): 60-72.  
LI W G, LONG C, LUO Z Y, et al. Review of failure mechanism and modification research of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(6): 60-72. (in Chinese)
- [6] 周静海,王凤池,孟宏宪,等. 废弃纤维再生混凝土及构件[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2014.  
ZHOU J H, WANG F C, MENG X H, et al. Waste fiber recycled concrete and components [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2014. (in Chinese)
- [7] XIAO J Z, LI L, TAM V W Y, et al. The state of the art regarding the long-term properties of recycled aggregate concrete [J]. Structural Concrete, 2014, 15(1): 3-12.
- [8] 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.
- [9] GENG Y, WANG Y, CHEN J. Creep behaviour of concrete using recycled coarse aggregates obtained from source concrete with different strengths [J]. Construction and Building Materials, 2016, 128(15): 199-213.
- [10] 曹万林,冯宇,乔崎云,等. 长期荷载作用下再生混凝土梁徐变性能试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 127-132.  
CAO W L, FENG Y, QIAO Q Y, et al. Experimental study on long-term deformation performance of full-sized recycled reinforced concrete beams [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 127-132. (in Chinese)
- [11] RAVINDRARAJAH R S, TAM C T. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate [J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37(30): 29-38.
- [12] 肖建庄,郑世同,王静. 再生混凝土长龄期强度与收缩徐变性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1): 21-26.  
XIAO J Z, ZHENG S T, WANG J. Long-term strength and shrinkage creep properties of recycled concrete [J]. Journal of Building Science and Engineering, 2015, 32(1): 21-26. (in Chinese)
- [13] 罗素蓉,郑欣,黄海生. 再生粗骨料预处理及再生混凝土徐变试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 242-247.  
LUO S R, ZHENG X, HUANG H S. Experimental study on pretreatment of recycled coarse aggregate and creep behavior of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 242-247. (in Chinese)
- [14] 肖建庄,许向东,范玉辉. 再生混凝土收缩徐变试验及徐变神经网络预测[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 752-757.  
XIAO J Z, XU X D, FAN Y H. Shrinkage and creep test of recycled concrete and prediction of creep neural network [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 752-757. (in Chinese)
- [15] 张建斌. 粉煤灰混凝土徐变的簇模型研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(7): 22-24, 53.  
ZHANG J B. Research on cluster model of fly ash concrete creep [J]. Highway Traffic Technology (Application Technology Edition), 2018, 14(7): 22-24, 53. (in Chinese)



- [16] CASTEL A, FOSTER S J, NG T, et al. Creep and drying shrinkage of a blended slag and low calcium fly ash geopolymer concrete[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(5):1619-1628.
- [17] 周静海,葛峰,康天蓓,等. 长期持续荷载下废弃纤维再生混凝土徐变破坏规律研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(10):3317-3321.
- ZHOU J H, GE F, KANG T B, et al. Study on creep destruction law of waste fiber recycled concrete under long-term continuous Load [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(10):3317-3321. (in Chinese)
- [18] 于俊超. 工程纤维对混凝土徐变性能的影响[D]. 河北秦皇岛:燕山大学, 2013.
- YU J C. Effect of Engineering Fiber on Creep Behavior of Concrete [D]. Qinhuangdao, Hebei: Yanshan University, 2013. (in Chinese)
- [19] 建设用卵石、碎石: GB/T 14685—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.
- Construction with pebbles and gravel: GB/T 14685-2011 [S]. Beijing: China Standards Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 混凝土用再生粗骨料: GB/T 25177—2010. [S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- Recycled coarse aggregate for concrete: GB/T 25177—2010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2010. (in Chinese)
- [21] 周静海,陈平,王凤池,等. 废弃纤维再生混凝土试验与数值模拟[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.
- ZHOU J H, CHEN P, WANG F C, et al. Test and numerical simulation of waste fiber recycled concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)
- [22] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009. [S]. 北京:中国标准出版社, 2009.
- Standard test method for long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082-2009 [S]. Beijing: China Standards Press, 2009. (in Chinese)
- [23] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2002. [S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081-2002 [S]. Beijing: China Standards Press, 2002. (in Chinese)
- [24] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures [S]. American Concrete Institute, 1992.
- [25] GARDNER J, LOCKMAN M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(2): 136-167
- [26] CODE CEB-FIP. Model code for concrete structures[J]. Comité Euro-International du Béton, Secretariat Permanent, Case Postale, 1990.
- [27] 白国良,祁豪,刘超. 再生混凝土徐变试验与预测模型研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(Sup2):121-126.
- BAI G L, QI H, LIU C. Research on creep test and prediction model of recycled concrete[J]. *Journal of Building Structure*, 2016, 37 (Sup2): 121-126. (in Chinese)

(编辑 胡玲)