

文章编号:1673-2049(2015)06-0036-07

# 混杂纤维 RAC 框架节点的有限元分析

王社良,鲁元龙,樊禹江

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

**摘要:**利用再生钢纤维与聚丙烯纤维(TANK 纤维)对再生骨料混凝土(RAC)进行了性能增强,并进行了相应的基本材性试验,利用所得数据确定了混杂纤维掺量(质量分数)0%,0.3%,0.5%,1.0%下的纤维再生混凝土本构方程;利用有限元软件 ABAQUS 对不同混杂纤维掺量 RAC 框架节点进行了拟静力非线性分析,得出相应的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化曲线,并分析了其耗能性能和等效粘滞阻尼系数。结果表明:混杂纤维能够较为有效地改善 RAC 的基本力学性能,同时对于框架节点的抗震性能亦有较为明显的改善,并且随着混杂纤维掺量的增大,其抗震性能均有所提高。

**关键词:**混杂纤维;再生骨料混凝土;ABAQUS;框架;节点;滞回曲线;等效粘滞阻尼系数

**中图分类号:**TU528.041

**文献标志码:**A

## Finite Element Analysis of RAC Frame Joints Containing Hybrid Fibers

WANG She-liang, LU Yuan-long, FAN Yu-jiang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** Adding steel fiber and TANK fiber into recycled aggregate concrete (RAC) to enhance its performance, the corresponding basic material property tests were carried out. The constitutive equation of the RAC was determined by using the obtained experimental data, which had different hybrid fiber content (mass fraction) 0%, 0.3%, 0.5%, 1.0%. The finite element software ABAQUS was used to conduct pseudo-static nonlinear analysis of the RAC frame joints with different hybrid fiber contents. The hysteresis curves, skeleton curves and the stiffness degradation curves were obtained, the energy dissipation capacity and equivalent viscous damping coefficients were analyzed. The results show that hybrid fiber can be more effective to improve the basic mechanical properties of the RAC. Meanwhile, the seismic performance of the frame joints has a more significant improvement. With the increasing of hybrid fiber content, the seismic performance of RAC can be improved.

**Key words:** hybrid fiber; recycled aggregate concrete; ABAQUS; frame; joint; hysteresis curve; equivalent viscous damping coefficient

## 0 引言

随着中国城市化脚步的加快,建设所产生的大量建筑废料亟待处理,其中仅废弃混凝土就已超过

$2 \times 10^7 \text{ t}^{[1-2]}$ 。再生骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)简称再生混凝土,是将废弃混凝土块经过破碎、清洗、分级后,按一定比例与级配混合形成再生混凝土骨料,部分或全部代替砂石等天然

收稿日期:2015-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51178388, 51008245);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(11JS059, 12JS055)

作者简介:王社良(1956-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: wangshel@aliyun.com。

骨料(主要是粗骨料)配制而成的新型混凝土<sup>[3-4]</sup>。各国学者大多把研究重点放在再生骨料取代率对 RAC 的基本力学性能影响上,但对如何进一步增强再生混凝土性能的研究相对较少,高丹盈等<sup>[5]</sup>在再生混凝土中掺入不同类型钢纤维,结果表明由于钢纤维的掺入,再生混凝土试块的抗压增强比达到 1~1.28,在一定程度上提高了其抗压强度。为了将 RAC 更广泛地运用在工程中,有必要对提高 RAC 基本力学性能的方法进行进一步研究。

本文通过在再生混凝土中掺入二元混杂纤维(钢纤维和聚丙烯纤维),改善普通 RAC 的基本力学性能。通过基本力学性能试验数据得出不同纤维掺量下的 RAC 本构关系,利用有限元软件 ABAQUS 对混杂纤维掺量分别为 0%,0.3%,0.5%,1.0%的 RAC 框架节点(各节点的构造均相同)进行拟静力非线性模拟试验,并对模拟结果进行对比分析,所得结论可为混杂纤维混凝土运用到实际工程中提供一定的理论依据。

### 1 混杂纤维混凝土本构关系

按照课题组试配所得的 C30 的 RAC 配合比,掺入由钢纤维和聚丙烯纤维(TANK 纤维)混合而成的混杂纤维(体积比为 7:3),其物理性能指标见表 1,2。依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),对 8 组共 24 个试件进行了力学性能试验,研究了不同混杂纤维掺量时 RAC 单轴受压状态下的应力-应变曲线变化规律。图 1 为再生骨料取代率为 100%和混杂纤维掺量分别为 0%,0.3%,0.5%,1.0%时棱柱体的抗压破坏形态。

表 1 TANK 纤维材料性能

Tab. 1 Material Properties of TANK Fiber	
性能参数	取值
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.91~0.93
抗拉强度/MPa	>500
热传导性	低
长度/mm	20
断裂延伸率/%	≥8
熔点/℃	160±5
纤维直径/μm	18~60
弹性模量/MPa	>4 000
耐晒强度保持率/%	≥50

混凝土单轴受压应力-应变关系是研究结构承载力与变形的依据。通过试验得出混杂纤维再生混凝土的基本力学性能如表 3 所示。由表 3 可以看出,混杂纤维的掺入对提高再生混凝土的抗压强

表 2 钢纤维材料性能

Tab. 2 Material Properties of Steel Fiber

性能参数	等效直径/mm	抗拉强度/MPa	长度/mm	长径比
取值	0.9±0.09	≥600	32±3	36±3.2

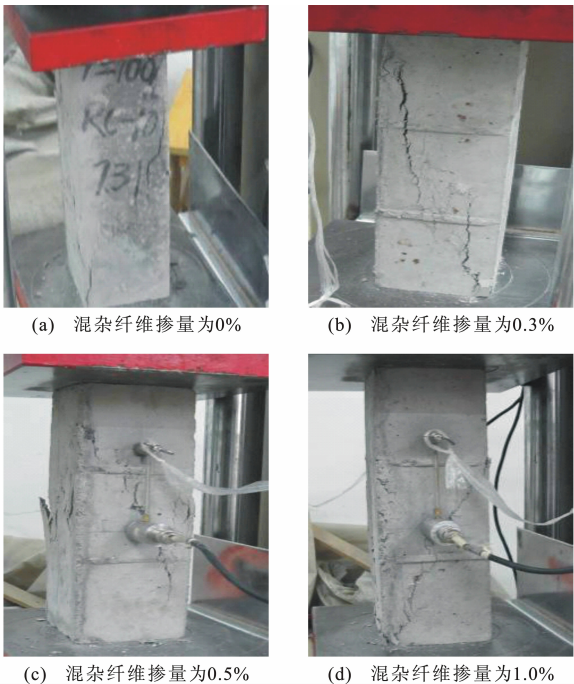


图 1 不同混杂纤维掺量时棱柱体的抗压破坏形态

Fig. 1 Compressive Failure Modes of Prism Under Different Hybrid Fiber Amounts

表 3 基本力学性能试验结果

Tab. 3 Experimental Results of Basic Mechanical Properties

试件编号	立方体抗压强度 $f_{cu}$ /MPa	轴心抗压强度 $f_c$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa
HF-0%	34.76	30.87	34.7
HF-0.3%	35.77	31.12	35.3
HF-0.5%	37.78	32.26	36.4
HF-1.0%	39.81	33.55	39.0

度与弹性模量有一定的作用,文献<sup>[6]~[9]</sup>指出其原因可能是由于混杂纤维起到叠加增强效应,2 种纤维相互纠缠在一起,并均匀分布在混凝土中形成了三维乱向支撑网,从而使其性能得到提高。限于试验条件等原因,仅完整获得该 RAC 试件的应力-应变(上升段)曲线<sup>[10]</sup>,如图 2 所示,其中, $\epsilon$ 为混凝土应变, $\epsilon_0$ 为混凝土受压峰值应力时对应的应变, $\sigma$ 为受压混凝土的压应力。为便于拟合,对坐标采取量纲一化处理,其中  $x=\epsilon/\epsilon_0$ , $y=\sigma/f_c$ ( $x,y$  为其横、纵坐标),从而使 4 条曲线最终交汇于一点,方便观察与处理数据。将试验数据进行最小二乘拟合,拟合结果如式(1)所示

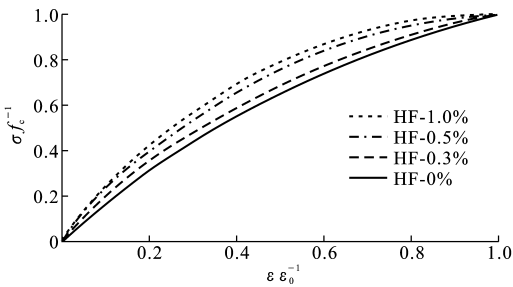


图 2 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain Curves

$$y=A+Bx+Cx^2+Dx^3 \quad 0\leq x\leq 1 \quad (1)$$

式中:  $A, B, C, D$  均为与混杂纤维掺量相关的系数, 各系数取值如表 4 所示。

将得到的应力-应变曲线与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中规定的公式进行对比, 结果相差不大, 故上升段采用以上数据, 下降段采用式

表 4 RAC 的应力-应变上升段曲线拟合系数

Tab. 4 Fitting Coefficients of RAC Ascending Stress-strain Curve

混凝土种类	混杂纤维掺量/%	A	B	C	D	R <sup>2</sup>
RAC-100%	0.0	0	1.819 48	−0.946 62	0.122 70	0.999 89
	0.3	0	2.148 79	−1.379 89	0.146 55	0.999 76
HF-RAC-100%	0.5	0	2.245 69	−1.449 63	0.196 77	0.999 84
	1.0	0	2.452 43	−1.651 99	0.178 03	0.999 61

注:  $R^2$  为判定系数; RAC-100%表示再生骨料取代率为 100%的再生混凝土; HF-RAC-100%表示再生骨料取代率为 100%的混杂纤维再生混凝土。

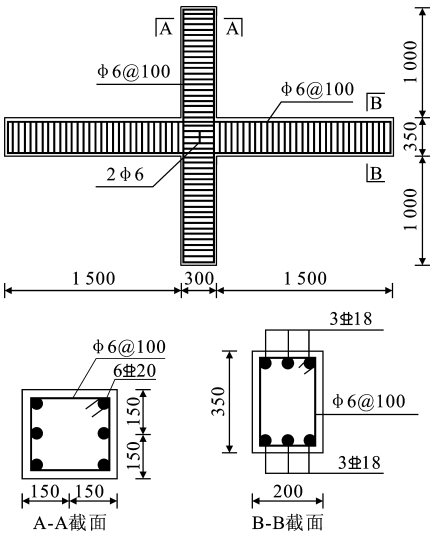


图 3 模型配筋 (单位: mm)

Fig. 3 Reinforcement of Model (Unit: mm)

3 有限元建模

3.1 节点建模

本文采用 ABAQUS 提供的 CDP 模型, 即塑性损伤模型<sup>[12-13]</sup>, 依据 Lubliner 等<sup>[14-15]</sup>提出的塑性损

(2)<sup>[11]</sup>的处理方法, 即

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - 0.15 \left( 1 - \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} \right) \right] \quad \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_c, \epsilon_c$  分别为曲线处于下降段时混凝土的应力和应变;  $\epsilon_{cu}$  为混凝土极限应变。

2 框架节点模型设计

本文节点模型设计采用“强构件弱节点”的设计思路, 使节点核心区先于梁端和柱端发生破坏, 充分发挥其核心区的承载能力, 具体设计方法为减小节点核心区的配箍率, 增大与之相连的梁柱配筋率, 控制轴压比为 0.2 (轴心力为 270 kN)。模型柱高为 2 350 mm, 截面尺寸为 300 mm × 300 mm, 两边梁长均为 1 500 mm, 截面尺寸为 200 mm × 350 mm, 具体配筋情况见图 3。框架节点模拟工况见表 5。

表 5 框架节点模拟工况

Tab. 5 Simulation Conditions of Frame Joints

节点编号	再生骨料取代率/%	混杂纤维掺量/%
RAC-0	100	0.0
RAC-1	100	0.3
RAC-2	100	0.5
RAC-3	100	1.0

注: 节点 RAC-0 为参照节点。

伤模型确定, 该模型为分析在循环加载和动态加载条件下混凝土结构的力学响应提供了普适的材料模型。模型考虑了材料受拉、受压时性能的不同, 用于模拟低静水压力下由损伤引起的不可恢复的材料退化。退化表现为材料的拉压屈服强度不相同, 在材料受拉屈服后表现出软化, 受压屈服后材料首先表现出硬化随后软化。拉压表现出不同的损伤和刚度退化, 对于模拟混凝土较为合适<sup>[16]</sup>。

采用 CDP 模型模拟该节点时由上述材性试验提供混凝土的本构关系。以损伤因子考虑混凝土的刚度退化, 不同纤维掺量下损伤因子根据材性试验所得数据与曲线依照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)并参考文献<sup>[17]</sup>所给出的公式计算得

出。在 ABAQUS 中输入的损伤因子不宜过大,否则容易导致程序不收敛,且需要注意当输入的塑性应变值随着非弹性应变值的增加变为负值或减小时 ABAQUS 会发出错误信息,即定义的压缩损伤曲线不正确。同理也要注意拉伸硬化曲线的定义,否则程序亦将无法运行下去。

图 4,5 分别为模型的钢筋骨架和节点网格划分。ABAQUS 中为用户提供了 3 种网格划分的方法,分别为结构网格划分技术、扫掠网格划分技术和自由网格划分技术。本文中试件的尺寸比较规整,均为 50 mm 的整倍数,故选择结构网格划分技术,且 50 mm 的网格足够满足计算精度,梁柱的交点处也不会因为梁柱取用不同网格尺寸而导致网格点不对应,进而引起计算不收敛,所以整个结构均采用 50 mm×50 mm 的网格<sup>[18]</sup>。

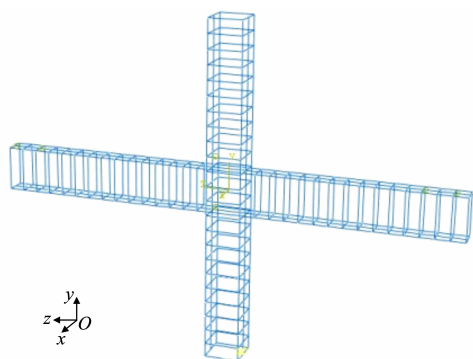


图 4 钢筋骨架

Fig. 4 Skeleton of Steel Bars

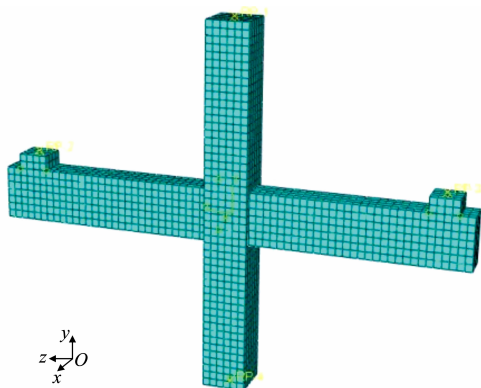


图 5 节点网格划分

Fig. 5 Mesh Division of Joint

### 3.2 加载制度

本文模拟采用荷载-位移混合控制加载制度。在梁的两端同步施加大小相同的反对称荷载或位移。梁的受拉主筋屈服前按荷载控制加载,当荷载分别为 10,15,20,25,30,35 kN 时进行往复循环加载。当加载到 35 kN 时,弹性工作阶段结束,梁的

主筋屈服,屈服位移为 19 mm。之后开始位移加载,以屈服位移的倍数控制加载,分别在试件的位移幅值达到 19,38,57,76 mm 时进行往复循环加载。在 ABAQUS 的分析步中设置 Step-1 给柱顶部施加 270 kN 的轴心力(轴压比为 0.2)<sup>[19]</sup>,在 Step-2 中采用力控制加载,当节点屈服时开始采用 Step-3 位移控制加载。

## 4 模拟结果分析

### 4.1 荷载-位移曲线

通过软件模拟出的各模型荷载-位移曲线对比如图 6 所示。

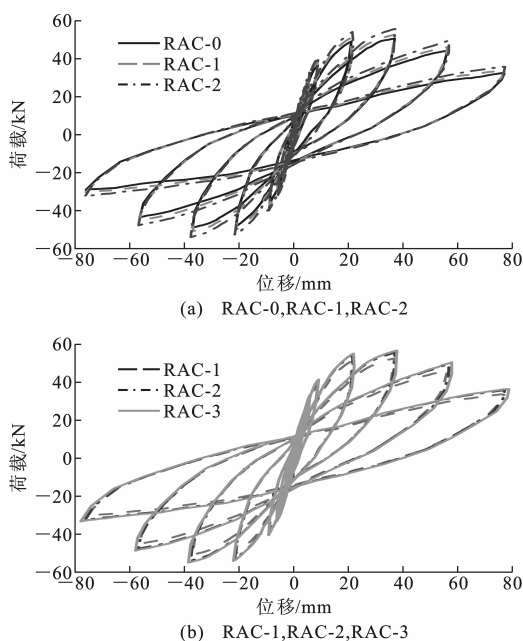


图 6 模型荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparisons of Load-displacement Curves of Models

由图 6 可以看出:当所施加荷载较小时,节点的滞回曲线呈直线循环,所包围的面积和残余应变均较小,可看作弹性阶段;随着荷载不断增大,节点核心区产生塑性变形,刚度开始退化,荷载继续增大时,荷载-位移曲线的坡度不断减小,且减小的幅度越来越大,直至整个核心区被剪坏,滞回曲线细长<sup>[20-22]</sup>。可以明显看出,随着混杂纤维掺量的增加,滞回曲线所包围的面积有不同程度的提高,RAC-3 的曲线甚至包裹住了 RAC-1 的曲线,滞回环面积明显增大,而 RAC-2 的曲线又与 RAC-3 的曲线几乎重合,说明当掺量超过 0.5% 时混杂纤维改性效果并不太明显。

4.2 骨架曲线

图 7 为模型骨架曲线对比。由图 7 可以看出：在低周反复荷载作用下各模型的曲线形状相似，上升段各曲线基本重合；强化段均较为平缓，这是由于节点核心区所受累积损伤较少，延性较好；输入的伤害因子使模型产生了下降段，刚度退化较为明显<sup>[23-24]</sup>。随着混杂纤维掺量的增大，节点承载力均有较为明显的提高。就节点极限荷载而言，RAC-1 较 RAC-0 提高了约 4%，而 RAC-2 比 RAC-0 提高了近 10%。RAC-3 混杂纤维的掺量是 RAC-2 的 2 倍，但其极限荷载值仅比 RAC-2 提高了 2% 左右，效果并不理想。

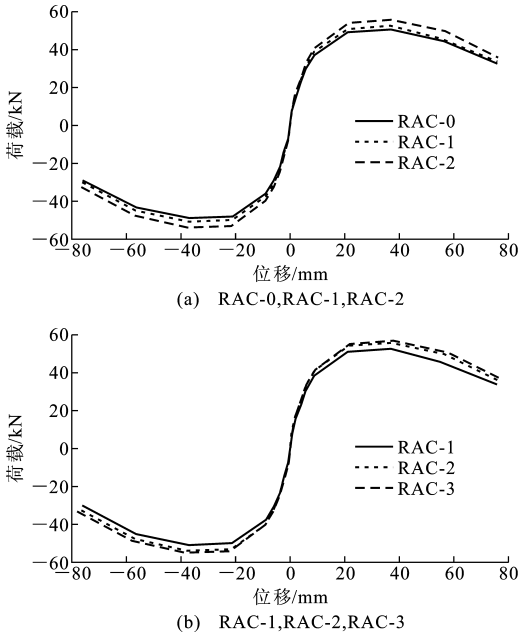


图 7 模型骨架曲线对比

Fig. 7 Comparison of Skeleton Curves of Models

4.3 刚度退化

刚度是构件在受力时抵抗变形的能力，其大小反映了构件变形的难易程度。刚度退化是指构件在低周反复荷载下单次循环荷载所产生的滞回环对角线的斜率小于上次滞回环的对角线斜率，随着加载持续进行，其滞回环对角线斜率不断减小。刚度退化充分体现出了材料的塑性变形，其根本原因在于材料塑性应变不断发展，损伤持续积累。本文刚度计算采用折算割线刚度，图 8 为模型刚度退化曲线对比。

图 8 可以看出，各曲线形状大致类似，掺入混杂纤维后试件的连续性和整体性加强，节点初期刚度明显提升，且随着混杂纤维掺量的增加，初期刚度不断增大，RAC-1 比 RAC-0 提高了约 5.5%，RAC-2

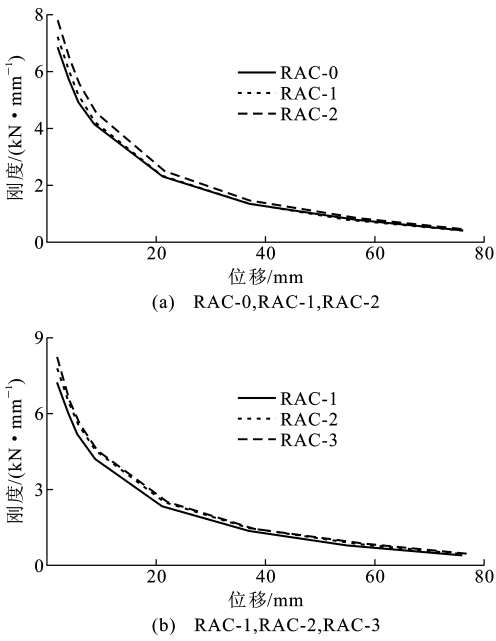


图 8 模型刚度退化曲线对比

Fig. 8 Comparisons of Stiffness Degradation Curves of Models

则高出 RAC-0 约 13.5%。然而当混杂纤维掺量提升到 1% 时，虽然初期刚度仍然有所提高，但是 RAC-3 的整体曲线与 RAC-2 的曲线几乎重合，说明混杂纤维掺量增加对试件整个受力过程的刚度提升并未起到太大作用。

4.4 耗能性能

当构件遭遇地震荷载时，构件的抗震性能主要是由其弹塑性工作状态下的耗能性能所决定的，构件通过材料内摩阻力及局部损伤吸收和耗散能量。构件耗能能力的大小由其对应位移的每个滞回环所包围的面积来确定，通过积分算出其包围的面积，即每级荷载下滞回环所消耗的能量  $Q$ ， $Q$  越大表明其耗能能力越强。图 9 为各节点模型耗能性能对比。

由图 9 可知，掺入混杂纤维后，节点的耗能性能均有提高，且掺量愈大，提高愈多，RAC-2 的耗能性

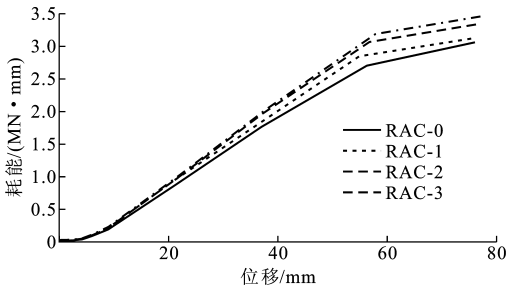


图 9 模型耗能性能对比

Fig. 9 Comparisons of Energy Dissipation Capacity of Models

能比 RAC-0 提高了约 9%,当混杂纤维掺量为 1% 时,比 RAC-0 提高了近 13%,这充分表明了混杂纤维再生混凝土的抗震性能优于普通再生混凝土。

4.5 等效粘滞阻尼系数

等效粘滞阻尼系数  $\xi_{eq}$  是低周反复荷载下构件耗能性能的另一种体现, $\xi_{eq}$  越大,构件耗能性能越好。等效粘滞阻尼系数仅反映了滞回环的饱满程度,与构件的承载能力无关。 $\xi_{eq}$  值随位移增大而不断增大,表明构件进入塑性阶段后消耗的能量逐步增多。表 6 为不同位移下的等效粘滞阻尼系数。

表 6 等效粘滞阻尼系数

Tab.6 Equivalent Viscous Damping Coefficients

节点编号	不同位移(mm)下的等效粘滞阻尼系数 $\xi_{eq}$			
	19	38	57	76
RAC-0	0.081	0.166	0.255	0.278
RAC-1	0.086	0.167	0.258	0.283
RAC-2	0.084	0.167	0.262	0.284
RAC-3	0.084	0.167	0.262	0.284

从表 6 可以看出,混杂纤维再生混凝土的滞回环饱满程度均优于普通再生混凝土,且随着混杂纤维再生混凝土用量的增加,滞回环亦愈发饱满,但是当混杂纤维掺量从 0.5% 增加到 1.0% 时,在所取精度范围内其值一样,说明混杂纤维掺量为 0.5% 时较为经济,适宜工程应用。

5 结 语

(1)在普通再生混凝土中掺入混杂纤维后,节点的滞回曲线更为饱满,构件的初期刚度、极限荷载、耗能性能、等效粘滞阻尼系数均有所增大。结果表明混杂纤维再生混凝土较普通再生混凝土可更好地为结构安全提供保障。

(2)随着混杂纤维掺量的增加,节点的抗震性能均有不同程度的提高。当混杂纤维掺量为 0.3% 时,各项指标虽有增长,但幅度不大;当混杂纤维掺量为 0.5% 时,性能增强明显,极限荷载提高近 10%,初期刚度提高 13.5%,各级荷载对应的等效粘滞阻尼系数也有不同程度增长;RAC-3 中混杂纤维的掺量是 RAC-2 的 2 倍,各项指标却增长甚微,等效粘滞阻尼系数在所取精度内甚至没有改变,故混杂纤维掺量选用 0.5% 较为经济。

(3)本文模拟结果表明在 ABAQUS 中使用 CDP 模型,输入合适的损伤因子,可以较为成功地模拟出节点真实受力情况,然而模拟试验有自身的局限性,还需试验加以验证。

参考文献:

References:

[ 1 ] 中国建筑材料科学研究院. 绿色建材与建材绿色化 [M]. 北京:化学工业出版社,2003.  
China Building Materials Academy. Green Building Materials and Building Materials Greenization [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2003.

[ 2 ] 池 漪,尹 健,李益进. 再生骨料混凝土的国内外研究概况[J]. 中国建材科技,2005(6):34-39.  
CHI Yi,YIN Jian,LI Yi-jin. The Internal and International Research on Recycled Aggregate Concrete and Application[J]. China Building Materials Science & Technology,2005(6):34-39.

[ 3 ] 王社良,赵 昆,张 博,等. 长龄期再生粗骨料对再生混凝土弹性模量影响的试验研究[J]. 混凝土,2011(10):43-45.  
WANG She-liang,ZHAO Kun,ZHANG Bo,et al. Experimental Analysis the Influence of Elastic Modulus Base on Different Eras Recycled Coarse Aggregates of Recycle Concrete[J]. Concrete,2011(10):43-45.

[ 4 ] 孙跃东,肖建庄. 再生混凝土骨料[J]. 混凝土,2004(6):33-36.  
SUN Yue-dong,XIAO Jian-zhuang. Aggregate of Recycled Concrete[J]. Concrete,2004(6):33-36.

[ 5 ] 高丹盈,楼志辉,王占桥. 钢纤维再生混凝土抗压强度试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2007,28(2):5-10.  
GAO Dan-ying,LOU Zhi-hui,WANG Zhan-qiao. Experimental Research on the Compressive Strength of Steel Fiber Recycled Concrete[J]. Journal of Zhengzhou University:Engineering Science,2007,28(2):5-10.

[ 6 ] 王 凯,张义顺,王信刚. 低掺量 S-P 混杂纤维增强增韧的作用研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(10):1209-1211.  
WANG Kai,ZHANG Yi-shun,WANG Xin-gang. Effect of Smaller Volume S-P Hybrid Fibers on Mechanical Properties of High Performance Concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2003,35(10):1209-1211.

[ 7 ] 焦楚杰,詹镇峰,彭春元,等. 混杂纤维混凝土抗压试验研究[J]. 广州大学学报:自然科学版,2007,6(4):70-73.  
JIAO Chu-jie,ZHAN Zhen-feng,PENG Chun-yuan, et al. Experimental Study of Hybrid Fiber Reinforced Concrete Under Compression[J]. Journal of Guangzhou University:Natural Science Edition,2007,6(4):70-73.



- [8] ESWARI S, RAGHUNATH P N, KOTHANDARAMAN S. Regression Modeling for Strength and Toughness Evaluation of Hybrid Fibre Reinforced Concrete[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2011, 6(5): 1-8.
- [9] 陈爱玖, 王 静, 杨 粉. 纤维再生混凝土力学性能试验及破坏分析[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 244-248, 265.  
CHEN Ai-jiu, WANG Jing, YANG Fen. Mechanical Properties Experiments and Failure Analysis of Fiber Recycled Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 244-248, 265.
- [10] 张波志, 王社良, 张 博, 等. 再生混凝土基本力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2011(7): 4-6.  
ZHANG Bo-zhi, WANG She-liang, ZHANG Bo, et al. Experimental Analysis of the Basic Mechanical Properties of Recycled Concrete[J]. Concrete, 2011(7): 4-6.
- [11] PARK R, PAULEY T. Reinforced Concrete Structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [12] ABAQUS Inc. ABAQUS Theory Manual[M]. Providence: ABAQUS Inc, 2007.
- [13] ABAQUS Inc. ABAQUS User's Manual[M]. Providence: ABAQUS Inc, 2007.
- [14] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A Plastic-damage Model for Concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [15] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [16] 张 劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127-130.  
ZHANG Jin, WANG Qing-yang, HU Shou-ying, et al. Parameters Verification of Concrete Damaged Plastic Model of ABAQUS[J]. Building Structure, 2008, 38(8): 127-130.
- [17] 曹 明. ABAQUS 损伤塑性模型损伤因子计算方法研究[J]. 交通标准化, 2012(2): 51-54.  
CAO Ming. Research on Damage Plastic Calculation Method of ABAQUS Concrete Damaged Plasticity Model[J]. Transportation Standardization, 2012(2): 51-54.
- [18] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
SHI Yi-ping, ZHOU Yu-rong. Example Explanation of ABAQUS Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [19] 王素裹, 韩小雷, 季 静, 等. 轴压比对 RC 框架实现“强柱弱梁”的影响研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(3): 96-101.  
WANG Su-guo, HAN Xiao-lei, JI Jing, et al. The Influence of Axial Compression Ratios on the Strong-column and Weak-beam Actualization of RC Frames[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(3): 96-101.
- [20] 卢 锦. 再生混凝土受压构件滞回性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
LU Jin. An Experimental Research on Hysteretic Behavior of Recycled Concrete Compression Member[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [21] 刘付钧, 蔡 健. 新型钢管混凝土柱-板节点受力性能非线性有限元分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(11): 91-96.  
LIU Fu-jun, CAI Jian. Nonlinear Finite Element Analysis on Mechanical Behavior of a New-type of CFST Column-slab Joint[J]. Building Structure, 2010, 40(11): 91-96.
- [22] YAMASAKI J, TATEMATSU K. Strength and Freeze-thaw Resistance Properties of Concrete Using High-quality Recycled Aggregate[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1999, 20: 45-52.
- [23] 柳炳康, 陈丽华, 周 安, 等. 再生混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 109-115.  
LIU Bing-kang, CHEN Li-hua, ZHOU An, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Recycled Aggregate Concrete Beam-column Interior-joints[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 109-115.
- [24] 肖建庄, 朱晓晖. 再生混凝土框架节点抗震性能研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 436-440.  
XIAO Jian-zhuang, ZHU Xiao-hui. Study on Seismic Behavior of Recycled Concrete Frame Joints[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(4): 436-440.