水　利　学　报
2018年6月　SHUILI　XUEBAO　第49卷　第6期

文章编号：0559-9350(2018)06-0670-08

纳米改性对再生混凝土双K断裂参数的影响

罗素蓉[1,2]，白俊杰[1]

（1. 福州大学 土木工程学院，福建 福州 350116；2. 福建省环保节能型高性能混凝土协同创新中心，福建 福州 350108）

摘要：再生骨料与天然骨料相比，表观密度低，吸水率大，压碎指标大，导致再生混凝土的性能较差。本文采用纳米SiO_2溶液对再生混凝土进行改性处理，通过三点弯曲梁法对再生骨料取代率不同（0，50%，70%，100%）的试件、取代率50%和100%下不同纳米SiO_2掺量的试件共12组60根试件进行断裂实验，用双K断裂参数评价再生混凝土的断裂性能，研究再生骨料取代率和纳米SiO_2掺量对再生混凝土断裂性能的影响。结果表明，再生混凝土的起裂韧度和失稳韧度整体随着再生骨料取代率的增加而降低；适量纳米SiO_2的掺入能提高再生混凝土的断裂韧度，再生骨料取代率50%和100%、纳米SiO_2掺量1.0%时再生混凝土的起裂韧度和失稳韧度提升程度最大，分别达到0.6929 MPa·$m^{1/2}$、1.3073 MPa·$m^{1/2}$和0.5552 MPa·$m^{1/2}$、1.2410 MPa·$m^{1/2}$。

关键词：再生混凝土；纳米SiO_2；断裂性能；三点弯曲梁法；双K断裂参数

中图分类号：TV431　**文献标识码：**A　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20171244

1　研究背景

再生骨料混凝土（Recycled Aggregate Concrete，RAC）指的是将废弃的混凝土进行裂解、破碎、清洗、筛分、分级后按照一定的比例混合制作成的再生混凝土骨料，用该再生骨料部分或者全部取代天然骨料而拌制成的混凝土[1-2]。由于再生骨料强度并不因普通混凝土的破坏而受到很大影响，因此废弃混凝土制成的骨料存在再利用的可能[3]。国内外对再生混凝土的利用已经制定有法律法规以规范和促进再生骨料的研究和利用，日本在1991年制定了《资源重新利用促进法》，强制规定了建筑废弃物必须送往“再生资源化设施”进行处理；美国制定《超级基金法》，明确规定生产废弃物的企业需将废弃物进行妥善处理[4-6]；在我国，2007年同济大学制定了上海市地方标准《再生混凝土应用技术规程》[7]，为再生混凝土技术的推广和应用起到了明确的指导作用；2011年住建部批准并颁布实施了行业标准《再生骨料应用技术规程》[8]。目前开展的研究工作已经证明了将废弃混凝土作为新混凝土的一个组成部分对性能是具有有效保证的[9]，肖建庄等[2]提出再生混凝土可应用于土木工程的非承重构件和某些承重结构中。在水利工程中，混凝土用量较大，如能将废混凝土通过一系列加工工艺制成再生骨料后用于混凝土的浇筑，使它成为循环可利用再生资源，既能减轻废混凝土对环境的污染，又能减小大量开采天然骨料对生态环境的影响，符合可持续发展的要求。但再生骨料和天然骨料相比较，其表层包裹或附着一定数量的旧水泥砂浆结构疏松，使得再生骨料的堆积密度和表观密度较天然骨料低。且老砂浆中的水泥石本身空隙率较高，吸水率较大，在破碎的过程中，大量的微裂缝在其内部形成，性能上会受到影响[10-11]。

纳米SiO_2因其优秀的性能特点，作为改善混凝土性能的改性材料获得了越来越多的应用。纳米SiO_2会与水泥中的$Ca(OH)_2$生成C-S-H凝胶，且纳米SiO_2在水泥复合结构中起到一个晶核的作用，

收稿日期：2017-12-23；网络出版日期：2018-05-21

网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180521.1034.002.html

基金项目：国家自然科学基金海峡联合基金重点项目（U1605242）；国家自然科学基金项目（51578153）

作者简介：罗素蓉（1963-），女，福建尤溪人，教授，主要从事高性能混凝土材料和结构研究。E-mail：lsr@fzu.edu.cn

使C-S-H凝胶在其表面键合，改变了结构形式，在水泥硬化浆体原有网络结构基础上又出现了键合大量纳米级的C-S-H凝胶的网络结点，构成三维网络结构，稳定性、强度和韧性得到了提高。此外，纳米SiO_2的掺入能够阻止混凝土内部裂缝的开展，提高混凝土的断裂韧度[12-13]。但纳米SiO_2因其高活性而容易发生团聚现象[14]而导致水泥浆稠度急剧增大，不能发挥纳米SiO_2的填充效应和晶核效应[15]。

徐世烺等[16-17]提出的用双K断裂参数来表征混凝土断裂性能的方式已经为学界所认可，目前已有许多学者对混凝土的断裂性能进行了研究。张廷毅等[18]研究了水灰比、相对切口深度、粗骨料最大粒径等因素对混凝土断裂韧度的影响。张秀芳等[19]将双K断裂计算理论由拟静态扩展到动态断裂韧度，研究了应变率对混凝土双K断裂韧度的影响。近年来，也有学者为了增强混凝土的断裂性能从材料层面对混凝土断裂性能进行研究，罗素蓉等[20]研究了自密实混凝土在掺入橡胶后的断裂性能，王利民等[21]通过试验研究了钢纤维混凝土的断裂过程。

本文通过三点弯曲梁法对再生骨料取代率和纳米SiO_2掺量不同的再生混凝土进行断裂试验，得到再生混凝土的双K断裂参数，以及再生骨料取代率和纳米SiO_2掺量对再生混凝土断裂性能的影响规律，为在实际工程中应用再生混凝土提供理论基础。

2 试验概况

2.1 试验材料 试验采用P·O42.5普通硅酸盐水泥；再生骨料来源为某路面废弃混凝土(破碎前对基体混凝土钻芯取样测得抗压强度20 MPa，基体混凝土使用年限11年)，经破碎、清洗、筛分形成粒径范围为5~20 mm连续级配的骨料；天然骨料为粒径5~20 mm的连续级配花岗岩碎石，砂为闽江河砂(细度模数为2.12)；水为自来水；减水剂为聚羧酸系高效减水剂。纳米SiO_2采用nm-SiO_2分散液(SiO_2含量15 %)。

2.2 试验设计 采用固定水胶比和砂率进行配合比设计，胶凝材料总量450 kg/m^3，砂率0.38，水胶比0.40。考虑再生骨料取代率和纳米SiO_2掺量为影响因素，设计了12组试验：(1)基准组。由天然骨料浇筑的混凝土，编号为NC。(2)取代率变化组。取代率为50 %、70 %、100 %，编号为RC50、RC70、RC100。(3)再生骨料取代率50 %下掺加纳米SiO_2组。掺量为0.5 %、1.0 %、1.5 %，编号为RC50-NS0.5、RC50-NS1.0、RC50-NS1.5。(4)再生骨料取代率100 %下掺加纳米SiO_2组。掺量为0.5 %、0.8 %、1.0 %、1.2 %、1.5 %，编号为RC100-NS0.5、RC100-NS0.8、RC100-NS1.0、RC100-NS1.2、RC100-NS1.5。

表1 混凝土配合比及力学性能参数

试件编号	混凝土配合比/(kg/m^3)							抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
	水泥	砂	水	天然骨料	再生骨料	纳米SiO_2溶液	减水剂		
NC	450	669	180	1091	0	0	2.7	52.58	34.47
RC50	450	669	180	545.5	545.5	0	3.60	51.82	21.86
RC70	450	669	180	327.3	763.7	0	4.05	48.84	22.03
RC100	450	669	180	0	1091	0	4.5	42.60	20.21
RC50-NS0.5	447.75	669	167.25	545.5	545.5	15	2.25	50.91	21.96
RC50-NS1.0	445.5	669	154.5	545.5	545.5	30	4.5	54.63	16.69
RC50-NS1.5	443.25	669	173.25	545.5	545.5	45	6.75	47.67	20.49
RC100-NS0.5	447.75	669	167.25	0	1091	15	2.25	43.98	16.60
RC100-NS0.8	446.4	669	159.6	0	1091	24	3.6	45.71	21.07
RC100-NS1.0	445.5	669	154.5	0	1091	30	4.5	46.79	19.05
RC100-NS1.2	444.6	669	149.4	0	1091	36	5.4	44.88	23.49
RC100-NS1.5	443.25	669	173.25	0	1091	45	6.75	40.78	15.51

注：其中纳米SiO_2指的是纳米SiO_2分散液中溶质的质量(SiO_2分散液中SiO_2含量为15%)。

混凝土配合比设计、立方体28 d抗压强度(150 mm×150 mm×150 mm)试验值见表1，表中弹性模量值是通过对三点弯曲梁法求得的*P*–*CMOD*曲线上升段进行线性拟合后，得到上升段斜率倒数c_i，进而求得弹性模量E[22]。

由表1可见，再生混凝土28 d抗压强度随着再生骨料取代率的增加而降低，降低的幅度在1.4 %～19.0 %之间，弹性模量整体随取代率的增加而减小；适量的纳米SiO_2掺量使再生混凝土的抗压强度提高，但提高的幅度不大，其中，再生骨料取代率50 %、100 %时，纳米SiO_2掺量为1.0 %时抗压强度较未掺加纳米SiO_2的再生混凝土分别提高5.4 %和9.8 %，当纳米SiO_2掺量超过1.0 %时，再生混凝土的抗压强度反而降低，且纳米SiO_2掺量越多，抗压强度下降程度越快。这是由于纳米SiO_2极易团聚，掺量较大时团聚处会成为试件受力的薄弱环节，使混凝土的抗压强度降低。

2.3　三点弯曲梁法　试验采用三点弯曲梁法测定混凝土的双K断裂参数，制作了12组共60根三点弯曲梁试件。试件尺寸为750 mm×150 mm×75 mm(长×高×厚)，跨高比为4，跨度*S*600 mm，缝高比0.3，缝高45 mm。试件尺寸如图1所示。本文试验采用MTS疲劳试验机(250kN)进行断裂试验，通过位移控制加载速率，加载速率为0.0005 mm/s，利用量程为1～3 mm的夹式引伸计对试验过程中试件裂缝张口位移进行测量，从而得到荷载–裂缝张口位移(*P*–*CMOD*)曲线。

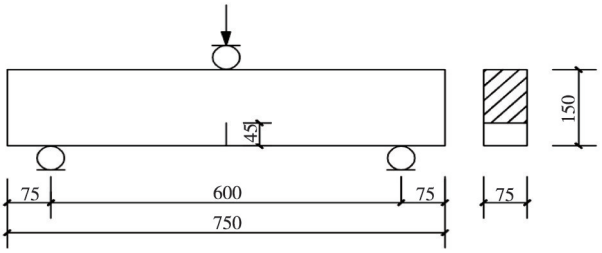


图1　三点弯曲梁几何尺寸(单位：mm)

2.4　双K断裂参数计算　徐世烺等[16-17]将Hillerborg等[23]虚拟裂缝模型和Jenq等[24]的弹性等效方法进行结合，通过大量的试验和数据分析后提出了双K断裂模型，其采用起裂断裂韧度$K_{\mathrm{Ic}}^{\mathrm{ini}}$和失稳断裂韧度$K_{\mathrm{Ic}}^{\mathrm{un}}$作为控制的参数。

起裂断裂韧度$K_{\mathrm{Ic}}^{\mathrm{ini}}$按下式计算[22]：

$$K_{\mathrm{Ic}}^{\mathrm{ini}}=\frac{1.5\left(F_{\mathrm{ini}}+\dfrac{mg}{2}\times10^{-2}\right)\times10^{-3}S\sqrt{a_0}}{th^2}f(\alpha) \tag{1}$$

其中

$$f(\alpha)=\frac{1.99-\alpha(1-\alpha)\left(2.15-3.93\alpha+2.7\alpha^2\right)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}},\quad \alpha=\frac{a_0}{h} \tag{2}$$

式中：F_{ini}为起裂荷载，kN；m为试件支座间的质量，kg，用试件总质量按*S*/*L*比折算，*S*、*L*分别为试件两支座间的跨度和试件长度，m；a_0为初始裂缝长度，m；t、h分别为试件的厚度和高度，m。

失稳断裂韧度$K_{\mathrm{Ic}}^{\mathrm{un}}$按下式计算[22]：

$$K_{\mathrm{Ic}}^{\mathrm{un}}=\frac{1.5\left(F_{\max}+\dfrac{mg}{2}\times10^{-2}\right)\times10^{-3}S\sqrt{a_{\mathrm{c}}}}{th^2}f(\alpha) \tag{3}$$

其中

$$f(\alpha)=\frac{1.99-\alpha(1-\alpha)\left(2.15-3.93\alpha+2.7\alpha^2\right)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}},\quad \alpha=\frac{a_{\mathrm{c}}}{h} \tag{4}$$

其中，a_c为有效裂缝长度，m，按下式计算：

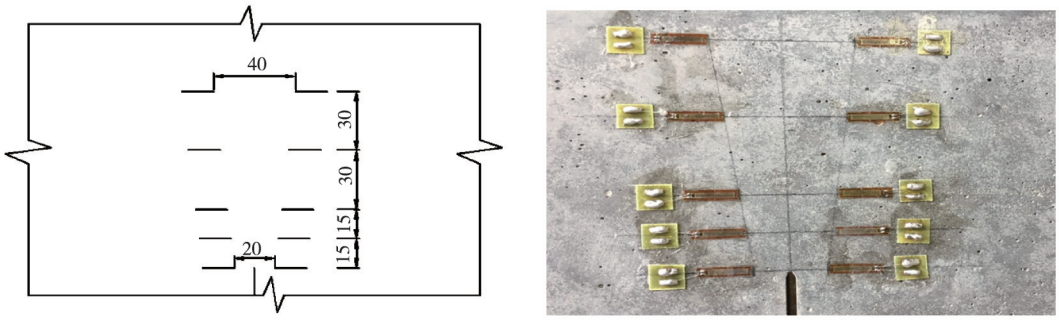
$$a_c=\frac{2}{\pi}(h+h_0)\arctan\sqrt{\frac{tEV_c}{32.6F_{max}}-0.1135}-h_0 \tag{5}$$

式中：h_0为固定夹式引伸计刀口的钢片厚度，m；V_c为裂缝张开位移临界值，μm；E为计算弹性模量，GPa，按下式计算：

$$E=\frac{1}{tc_i}\left[3.7+32.6\ \tan^2\left(\frac{\pi}{2}\frac{a_0+h_0}{h+h_0}\right)\right] \tag{6}$$

式中：c_i为初始柔度，$c_i=(CMOD)_i/P_i$，对$P-CMOD$曲线上升段进行线性拟合，得到上升段的斜率，即可得出初始柔度c_i。

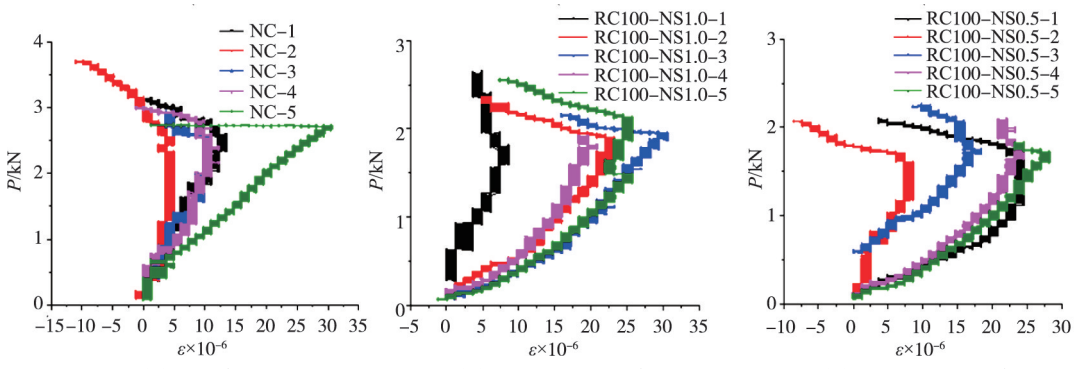
2.5　起裂荷载的测定　本文通过电测法[25]进行混凝土起裂荷载的测定。采用标距10 mm、间距20 mm的应变片进行试验。在裂缝尖端两侧各10 mm对称布置两枚标距为10 mm的应变片并与两枚补偿应变片组成全桥来测量起裂荷载。除裂缝尖端两侧外，在其他高度对称布置4组全桥应变片用来监测裂缝扩展的过程，通过32通道IMC动态数据采集系统采集数据。电阻应变片布置[26]如图2所示。



（a）电阻应变片布置（单位：mm）　　（b）电阻应变片定位布置

图2　电阻应变片布置

混凝土起裂之前，在裂缝尖端两侧会产生拉应变，且伴随着荷载增加而增大。当预制裂缝尖端处的拉应变达到极限时，混凝土因为应力集中现象而发生断裂，此时拉应变不再变化而荷载持续增大；混凝土发生断裂后，预制裂缝尖端两侧的变形发生释放表现为应变值的回缩[28]。各试验组每组有5根三点弯曲梁试件，电测法测得的部分试验组P–ε曲线见图3，各组起裂荷载试验值见表2。



（a）NC试件　（b）RC100–NS1.0试件　（c）RC100–NS0.5试件

图3　部分试件的P–ε曲线

由表2可见，再生混凝土起裂荷载整体随着再生骨料取代率的增加而降低，再生骨料取代率为50 %、70 %和100 %时，起裂荷载较普通混凝土NC分别降低了29.6 %、54.2 %和42.3 %；纳米SiO_2的掺入提高了再生混凝土的起裂荷载，其中，再生骨料取代率50 %和100 %、纳米SiO_2掺量为1.0 %时，起裂荷载较未掺纳米SiO_2的再生混凝土分别提高了39.9 %、27.3 %，但纳米SiO_2掺量超过1 %后

表2　起裂荷载和最大荷载试验结果

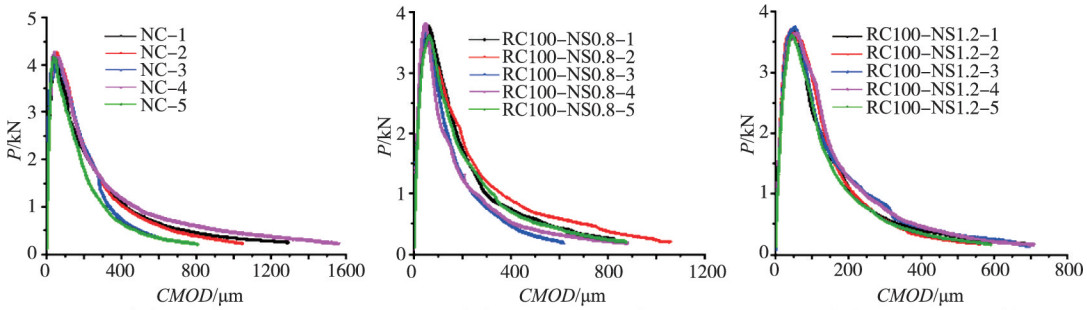
试件编号	F_{ini}/kN	F_{max}/kN	试件编号	F_{ini}/kN	F_{max}/kN
NC	2.60	4.21	RC50-NS1.5	1.41	3.53
RC50	1.83	3.64	RC100-NS0.5	1.69	3.61
RC70	1.19	3.41	RC100-NS0.8	1.70	3.72
RC100	1.50	3.32	RC100-NS1.0	1.91	3.80
RC50-NS0.5	2.19	3.71	RC100-NS1.2	1.66	3.68
RC50-NS1.0	2.56	3.99	RC100-NS1.5	1.53	3.52

注：表中数值均为各试验组有效数据的算术平均值。

起裂荷载有所降低。因此，适量的纳米SiO_2对起裂荷载有提升的作用，但过多的纳米SiO_2掺量对混凝土的起裂荷载的改善作用不明显甚至降低。

3　试验结果与分析

3.1　试验结果　采用三点弯曲梁法进行断裂试验得到*P-CMOD*曲线，每个试验组5根试件，限于篇幅，图4仅列出部分试验组试件的*P-CMOD*曲线。



（a）NC试件　（b）RC100-NS0.8试件　（c）RC100-NS1.2试件

图4　部分试件的*P-CMOD*曲线

12组试验组28 d双K断裂参数试验结果见表3。由表3可见，各试验组计算得到的变异系数较小，在0.0106～0.1017之间，说明试验结果的离散性较小，可信度较高。

表3　三点弯曲试件试验结果　（单位：MPa·m$^{1/2}$）

试件编号	F_{ini}/F_{max}	a_c/m	K_{Ic}^{ini}	K_{Ic}^{un}	试件编号	F_{ini}/F_{max}	a_c/m	K_{Ic}^{ini}	K_{Ic}^{un}
NC	0.619	0.071	0.7104	1.6957	RC50-NS1.5	0.399	0.060	0.4492	1.1320
变异系数			0.0239	0.0692	变异系数			0.0237	0.0578
RC50	0.503	0.062	0.5425	1.2482	RC100-NS0.5	0.468	0.056	0.5110	1.1681
变异系数			0.0193	0.1009	变异系数			0.0228	0.0521
RC70	0.348	0.061	0.4066	1.1649	RC100-NS0.8	0.456	0.061	0.5111	1.2391
变异系数			0.0106	0.0713	变异系数			0.0194	0.0399
RC100	0.453	0.061	0.4723	1.1430	RC100-NS1.0	0.503	0.058	0.5552	1.2410
变异系数			0.0500	0.0658	变异系数			0.0407	0.0584
RC50-NS0.5	0.591	0.064	0.6185	1.2785	RC100-NS1.2	0.449	0.061	0.4995	1.2384
变异系数			0.0348	0.0580	变异系数			0.0274	0.0511
RC50-NS1.0	0.643	0.052	0.6929	1.3073	RC100-NS1.5	0.435	0.061	0.4711	1.1851
变异系数			0.0134	0.0280	变异系数			0.0581	0.1017

注：表中数据均为各试验组有效数据的算术平均值。

3.2　再生骨料取代率对双K断裂参数的影响　将再生骨料取代率为50 %、70 %、100 %的混凝土（RC50、RC70、RC100）和普通混凝土（NC）的双K断裂参数进行对比，见图5。

由图5可见，再生混凝土起裂韧度随再生骨料取代率的增加而降低，取代率50 %、70 %和100 %的再生混凝土相比于普通混凝土起裂韧度降低了23.6 %、42.8 %和33.5 %。但在取代率100 %时，相较取代率70 %时有所回升。回升的原因可能是由于取代率100 %的再生混凝土中参与断裂路径扩展的砂浆数量增加，使得裂缝并不能很快的扩展，从而使起裂韧度提高。再生混凝土失稳韧度随再生骨料取代率的增加而降低，取代率50 %、70 %和100 %的再生混凝土相较普通混凝土失稳韧度降低了26.4 %、31.3 %和32.6 %。主要是因为再生骨料空隙较多，内部具有较多的裂缝，强度低的特点，使得其失稳韧度降低。

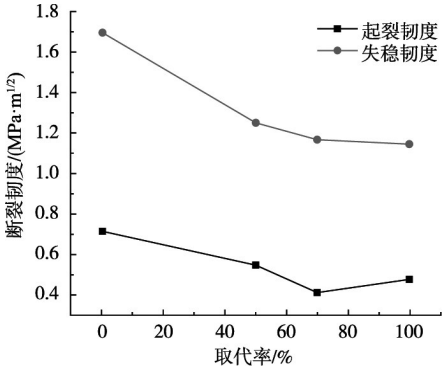


图5　取代率对双K断裂参数的影响

3.3　纳米SiO_2掺量对双K断裂参数的影响　试验首先对再生骨料取代率50 %和100 %下不同纳米SiO_2掺量(0.5 %、1.0 %、1.5 %)的双K断裂参数进行研究，结果发现，再生骨料取代率50 %、纳米SiO_2掺量为1.0 %时其断裂性能最优，且趋势明显，而再生骨料取代率100 %时，其纳米SiO_2最优掺量趋势并不明显。因此，对再生骨料取代率100 %的再生混凝土增加纳米SiO_2掺量为0.8 %、1.2 %的断裂性能试验，结果表明，纳米SiO_2掺量1.0 %时，再生混凝土具有较好的断裂性能。试验结果见图6。

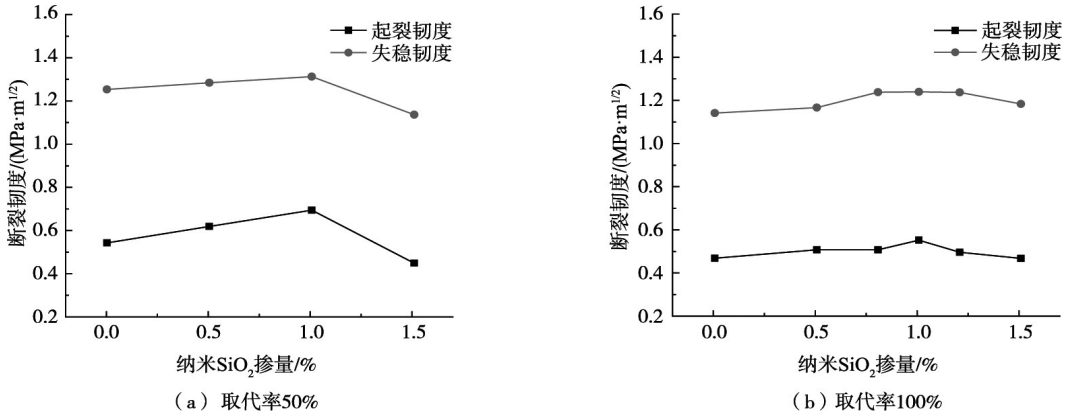


图6　纳米SiO_2掺量对双K断裂参数影响

由图6可见，再生骨料取代率50 %的再生混凝土、纳米SiO_2掺量0.5 %时，起裂韧度较无掺加纳米SiO_2的再生混凝土(RC50)提高了14.0 %，失稳韧度较RC50提高了2.4 %；纳米SiO_2掺量为1.0 %时，起裂韧度和失稳韧度同时达到最优值，分别较RC50提高了27.7 %和4.7 %。再生骨料取代率100 %时，起裂韧度和失稳韧度随着纳米SiO_2掺量的增加而提高，在纳米SiO_2掺量为1.0 %时，达到最优值，分别较RC100提高了17.6 %和8.6 %。掺量超过1 %后，起裂韧度和失稳韧度提高幅度下降；特别是纳米SiO_2掺量为1.5 %时，起裂韧度较RC100降低了0.3 %。

3.4　相同纳米SiO_2掺量下不同再生骨料取代率对双K断裂参数的影响　试验在同一纳米SiO_2掺量(0 %、0.5 %、1.0 %、1.5 %)下研究不同再生骨料取代率(50 %、100 %)对再生混凝土起裂韧度及失稳韧度的影响，见图7。

由图7可见，在相同纳米SiO_2掺量下，起裂韧度和断裂韧度整体随着再生骨料取代率的增加而降低，但在纳米SiO_2掺量1.5 %时，再生骨料取代率100%的起裂韧度和断裂韧度反而分别提高了4.9 %和4.7 %，说明纳米SiO_2对再生混凝土的改性效果不仅与纳米SiO_2掺量相关，还与再生骨料取代率有关。

通过分析不同取代率和不同纳米SiO_2掺量后发现，适量的纳米SiO_2可以提高混凝土的断裂韧度，主要是因为纳米SiO_2可以填充混凝土内部空隙，起到“填充效应”，还能细化氢氧化钙晶粒，有利于界面强度的提高。但纳米SiO_2掺量不宜过大，对于纳米SiO_2掺量1.5 %来说，在再生骨料取代率50 %下，起裂韧度和失稳韧度较RC50相比下降的幅度较大，可能是由于纳米SiO_2比表面积大，拌合

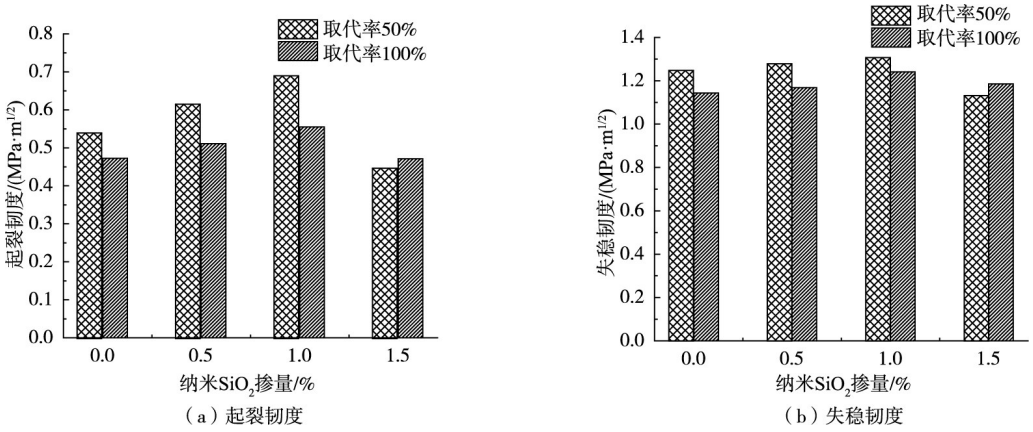


图7　相同纳米SiO_2掺量下再生骨料取代率对双K断裂参数的影响

后吸附了大量表层水，减少了参与水化的水量，使得水化程度降低，导致水化不完全，影响了再生混凝土断裂性能。再生骨料取代率100 %下，纳米SiO_2掺量1.5 %的再生混凝土较再生混凝土(RC100)相比起裂韧度和失稳韧度变化不大，其原因是再生混凝土外围包裹了较多的老砂浆，虽然纳米SiO_2掺量较多，但可改善的界面过渡区也更多，有较多的纳米SiO_2可以发挥其效用，但由于纳米SiO_2掺量较多，可能发生了团聚现象，水泥浆的稠度大幅度增大，无法发挥纳米SiO_2的填充效应和晶核效应，最终并不能有效的改善混凝土的断裂性能。

4　结论

(1)再生混凝土的双K断裂参数随着再生骨料取代率的增加而降低。(2)掺加适量的纳米SiO_2能有效改善再生混凝土的断裂性能，再生骨料取代率50 %、纳米SiO_2掺量1.0 %时，起裂韧度达0.6929 MPa·$m^{1/2}$，基本接近普通混凝土的起裂韧度0.7104 MPa·$m^{1/2}$，且失稳韧度较RC50提升幅度最大，达到1.3073 MPa·$m^{1/2}$；再生骨料取代率100 %、纳米SiO_2掺量1.0 %时，混凝土起裂韧度和失稳韧度较RC100分别提高了17.6 %和8.6 %，达到0.5552 MPa·$m^{1/2}$和1.2410 MPa·$m^{1/2}$，可以看出纳米SiO_2掺量1.0 %时提升再生混凝土断裂性能的效果最好，因此1.0 %掺量可作为改善再生混凝土断裂性能的最优掺量。(3)过多的掺入纳米SiO_2对再生混凝土的断裂性能的改善并不明显，甚至可能会由于团聚效应使再生混凝土的断裂性能降低。

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] 肖建庄，李佳彬，兰阳. 再生骨料混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土，2003(10)：17-20.

[3] 梁芮，于江，秦拥军. 废弃混凝土再生骨料的研究综述[J]. 混凝土，2013(5)：93-96.

[4] 王亨，单玉坤. 再生混凝土的研究发展现状综述[J]. 黑龙江科技信息，2011(22)：265-265.

[5] 陈永刚，曹贝贝. 再生混凝土国内外发展动态[J]. 国外建材科技，2004，25(3)：4-6.

[6] KHALAF F M，DEVENNY A S. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete：review [J]. Journal of Materials in Civil Engineering，2014，16(4)：331-340.

[7] DG/TJ 08-2018-2007，再生混凝土应用技术规程[S]. 上海：同济大学出版社，2007.

[8] JGJ/T240-2011，再生骨料应用技术规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[9] RAO A，JHA K N，MISRA S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete[J]. Resources Conservationand Recycling，2007，50(1)：71-81.

[10] 李佳彬，肖建庄，孙振平. 再生粗集料特性及其对再生混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰，2005，17(5)：390-395.

[11] 孙跃东，肖建庄．再生混凝土骨料[J]．混凝土，2004(6)：33-36．
[12] 张鹏，李清富，朱海堂，等．纳米SiO_2和钢纤维增强混凝土的断裂韧度[J]．建筑材料学报，2017，20(3)：366-372．
[13] 王宝民．纳米$Si0_2$高性能混凝土性能及机理研究[D]．大连：大连理工大学，2009．
[14] 孔德玉，杜祥飞，杨杨，等．纳米二氧化硅团聚特性对水泥水化硬化性能的影响[J]．硅酸盐学报，2012，40(11)：159-160．
[15] 王宝民．纳米二氧化硅高性能混凝土性能及机理[M]．沈阳：辽宁科学技术出版社，2012．
[16] XU S L，REINHARDT H W．Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture Part Ⅲ：Compact tension specimens and wedge splitting specimens[J]．International Journal of Fracture，1999，98(2)：179-193．
[17] 徐世烺．混凝土断裂力学[M]．北京：科学出版社，2011．
[18] 张廷毅，高丹盈，郑光和，等．三点弯曲下混凝土断裂韧度及影响因素[J]．水利学报，2013，44(5)：601-607．
[19] 张秀芳，胡少伟，胡晓威．混凝土双K断裂韧度的率相关性[J]．水利学报，2016，47(10)：1287-1297．
[20] 罗素蓉，陈伟妹，王雪芳．橡胶自密实混凝土断裂性能试验研究[J]．水利学报，2015，46(2)：217-222．
[21] 王利民，戈晓霞，刘露，等．钢纤维混凝土断裂过程测试与力学性能[J]．水利学报，2009，40(8)：995-1001．
[22] 徐世烺．混凝土断裂试验与断裂韧度测定标准方法[M]．北京：机械工业出版社，2009．
[23] HILLERBORG A，MODÉER M，PETERSSON P E．Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]．Cement and Concrete Research，1976，6(6)：773-781．
[24] JENQ Y S，SHAH S P．Two parameter fracture model for concrete[J]．Journal of Engineering Mechanics，1985，111(10)：1227-1241．
[25] 赵志方．基于裂缝粘聚力的大坝混凝土断裂特性研究[R]．北京：清华大学，2004．
[26] 余秀丽．电测法测量混凝土起裂荷载及掺UHTCC混凝土增韧作用研究[D]．杭州：浙江大学，2015．
[27] 徐世烺，余秀丽，李庆华．电测法确定低强混凝土裂缝起裂和等效裂缝长度[J]．工程力学，2015，32(12)：84-89．

Effect of nano-modification on double-K fracture parameters of recycled concrete

LUO Surong[1, 2]，BAI Junjie[1]

(1. *College of Civil Engineering，Fuzhou University，Fuzhou* 350116，*China*；2. *Environmental Protection Energy-Saving Collaborative Innovation Center of High-Performance Concrete in Fujian Province，Fuzhou* 350108，*China*)

Abstract：Compared with natural aggregate，recycled aggregate has lower apparent density，higher water absorption and larger crushing index. Therefore，there are some defects in the performance of recycled aggregate concrete (RAC). In this paper，nano-SiO_2 solution was used to strengthen RAC. Three-point bending beam method was adopted to conduct fracture experiment of specimens with varying recycled aggregate replacement rates (0，50%，70%，100%) and specimens with varying replacement rates (50% and 100%) and varying SiO_2 addition，12 groups of 60 specimens in all. Double-K fracture parameters were used to assess the fracture property of recycled concrete and to investigate the effect of recycled aggregate replacement rates and addition of SiO_2 on the fracture property of recycled concrete. The results show that the initial cracking toughness and the unstable fracture toughness of RAC decreased with the increase of RAC rate. Appropriate amount of nano-SiO_2 can improve the fracture toughness of RAC，when the replacement rates of recycled aggregate were 50% and 100% respectively，and the content of nano-SiO_2 was 1.0%，the enhancement for initial cracking toughness and unstable fracture toughness of recycled concrete was the highest，reaching 0.6929 MPa·$m^{1/2}$ and 1.3073 MPa·$m^{1/2}$ respectively for recycled concrete with 50% recycled aggregate and 0.5552MPa·$m^{1/2}$ and 1.2410MPa·$m^{1/2}$ respectively for recycled concrete with 100% recycled aggregate.

Keywords：recycled concrete；nano-SiO_2；fracture property；three-point bending beam method；double-K fracture parameters

(责任编辑：王冰伟)