

文章编号:1671-6833(2006)02-0018-06

# 再生混凝土无腹筋梁斜截面受力性能试验研究

张雷顺, 张晓磊, 闫国新

(郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**通过13根再生混凝土梁和普通混凝土梁的对比试验,探讨了再生骨料取代率、剪跨比等因素对再生混凝土梁斜截面受力性能的影响.试验结果表明:再生混凝土梁比普通混凝土梁变形和斜裂缝宽度大;再生混凝土梁的破坏形式与剪跨性有关, $\lambda \leq 1$ 发生斜压破坏, $1.5 \leq \lambda < 3$ 发生剪压破坏, $\lambda \geq 3.0$ 发生斜拉破坏.再生混凝土梁随着再生骨料取代率的增加,抗剪承载力有下降的趋势;随着剪跨比的增加,抗剪承载力减小.在试验研究的基础上,根据极限平衡理论,提出了再生混凝土梁受剪承载力计算公式.

**关键词:**再生混凝土;梁;无腹筋梁;受剪承载力

**中图分类号:** TU 528 **文献标识码:** A

## 0 引言

随着旧混凝土工程的改造,大量废弃混凝土引发的环境问题日益突出,直接丢弃不仅要占用大量的耕地,而且还要花费大量的运费.另外,混凝土生产需要大量的砂石骨料,天然砂石的开采对生态环境破坏也十分严重<sup>[1]</sup>.为了解决这些问题,各国开始了对再生混凝土的研究开发和应用.所谓再生混凝土,就是旧建筑物或结构物解体的混凝土经破碎分级成粗细骨料,用以代替混凝土中的部分砂石而配制成的混凝土.目前,国内外众多学者偏重于再生混凝土的材料性能的研究<sup>[2-4]</sup>,而对再生混凝土用于构件方面的研究还比较少,尤其是对再生混凝土构件抗剪性能的研究更少,对再生混凝土梁的抗剪机理还缺乏深入了解,基于此,笔者对再生混凝土梁抗剪问题做了一些初步研究.

究更少,对再生混凝土梁的抗剪机理还缺乏深入了解,基于此,笔者对再生混凝土梁抗剪问题做了一些初步研究.

## 1 试验概况

### 1.1 混凝土配合比

试验中再生骨料是由试验室废弃的混凝土人工破碎而成,废弃混凝土经回弹仪测得强度为C20~C40.水泥采用32.5R普通硅酸水泥.再生粗骨料粒径为5~20 mm连续级配,天然粗骨料为5~20 mm连续级配碎石,细骨料均为天然河砂.考虑到再生骨料吸水率高的问题<sup>[5]</sup>,本次试验再生混凝土梁浇筑时加入0.4%的减水剂.本文混凝土采用的配合比如表1所示.

表1 混凝土配合比

Tab.1 Mixture proportions of concrete

再生粗骨料 取代率%	水灰比	砂率	每 m <sup>3</sup> 混凝土材料用量/kg					
			水泥	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	水	减水剂
0	0.57	0.36	342	670.7	1 192.0	0	195	0
30	0.60	0.35	325	676.8	842.1	360.9	195	1.3
50	0.60	0.35	325	676.8	601.5	601.5	195	1.3
70	0.60	0.35	325	676.8	360.9	842.1	195	1.3
100	0.60	0.35	325	676.8	0	1 203.0	195	1.3

### 1.2 试件设计

根据本次试验的目的,试件设计时考虑的主要参数是剪跨比和再生骨料取代率,试验共制作

13根梁,分为两个系列,LC梁系列是普通混凝土梁,LR系列是再生混凝土梁,梁的截面采用矩形,截面宽150 mm和高300 mm,梁长为2 400 mm和

收稿日期:2006-01-10;修订日期:2006-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59778045)

作者简介:张雷顺(1950-),男,河南郑州人,郑州大学教授,主要从事混凝土非线性有限元分析及混凝土工程补强加固技术研究.

万方数据

2 000 mm两种. 每根试验梁浇筑时预留 6 个  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  立方体试块, 用于测得混凝土的抗压强度和劈拉强度. 所选用的纵向钢筋为 II 级热轧钢筋, 直径为 25 mm,  $f_y = 357\text{ MPa}$ ,  $f_{su} = 537\text{ MPa}$ , 所有试验梁都采用相同配筋, 纵筋配筋率 2.49%, 见图 1.

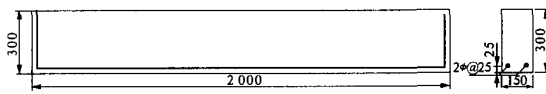


图 1 梁的尺寸及配筋图

Fig.1 Dimensions and reinforced bars of beams

### 1.3 加载装置及测试内容

试验采用两点对称集中加载, 试验装置见图 2 所示. 正式加载前先进进行预加载, 确定各测量仪表工作状态正常, 然后每级荷载为估计承载力的 1/10 施加, 每级荷载稳定 3 min 再读数, 在预估临界斜裂缝产生前后适当减小加载级差, 以便较为准确地判断斜截面开裂荷载. 当荷载接近极限时连续加载至破坏, 试验数据由计算机自动连续采集. 试验测试内容主要有: 利用数据自动采集系统自动采集测读并记录试验梁上施加的荷载值、钢筋应变值、混凝土应变值, 利用手持应变仪测得跨中混凝土应变值, 利用各测点布置的百分表测读各测点挠度值, 并由裂缝观测仪测读裂缝宽度值、记录下裂缝的开展情况.

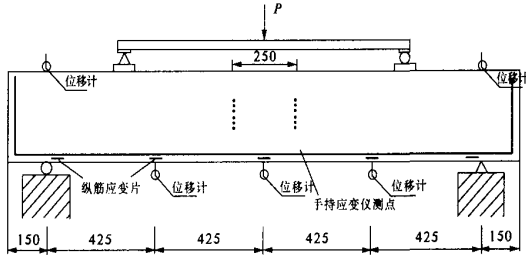


图 2 试验装置及仪表布置图

Fig.2 Testing fixture and instrument collocation

## 2 试验现象及其分析

### 2.1 裂缝类型

通过观察裂缝的出现早晚, 出现的顺序以及开展形态和速度等可以大致判断出构件的受力情况. 本试验观察的裂缝按成因可以分为弯曲裂缝、弯剪斜裂缝、腹剪斜裂缝.

(1) 弯曲裂缝. 试验过程中观察到, 梁的跨中和加载点处底面首先出现弯曲裂缝, 弯曲裂缝出现后就没有明显开展, 宽度和长度都扩展很慢, 随着荷载增加, 弯曲裂缝数量逐渐增加, 且这些弯曲

裂缝间距基本相等, 直到构件破坏时, 所有弯曲裂缝宽度均小于 0.1 mm.

(2) 弯剪斜裂缝. 在剪跨区, 随着荷载的增加, 由梁下缘的弯曲裂缝转而向上发展成斜裂缝, 裂缝下宽上窄, 并大部分弯向加载点.

(3) 腹剪斜裂缝. 在加载点与支座连线的腹部出现中间宽两头窄的斜裂缝, 腹剪斜裂缝的出现比较突然, 一出现就有梁高的 50% 左右, 随着荷载的增加, 腹剪斜裂缝分别向上朝着加载点向下朝着支座方向发展, 最终可能发展为临界斜裂缝.

从本次试验观察的结果来看, 就裂缝类型而言, 再生混凝土梁与普通混凝土梁并没有本质区别, 不过通过裂缝观测仪可以观察到, 在相同荷载下再生混凝土梁斜裂缝的宽度要比普通混凝土梁斜裂缝的宽度大.

### 2.2 试件破坏形态

试验结果表明, 随着剪跨比的变化, 无腹筋再生混凝土梁斜截面的破坏仍主要表现为斜压破坏、剪压破坏和斜拉破坏三种破坏形态. 如图 3 所示.

(1) 斜压破坏. 对再生混凝土试件, 当剪跨比  $\lambda \leq 1$  时构件发生这种破坏, 加载点与支座之间形成一斜向受压的“短柱”, 破坏时产生多条大体平行的斜裂缝, 梁腹发生类似于柱受压的侧向膨出, 有很高的承载力. LR-1.0-1 的破坏形态即是斜压破坏.

(2) 剪压破坏. 当剪跨比  $1.0 < \lambda < 3.0$  时, 梁发生剪压破坏. 在这种破坏形态中, 随着荷载的增加, 弯剪斜裂缝或腹剪斜裂缝中有一条形成临界斜裂缝, 向梁顶发展, 达到破坏荷载时, 斜裂缝顶端的混凝土在剪应力和压应力共同作用下被压碎而破坏, 它的特点是破坏过程比斜拉破坏过程缓慢一些, 其破坏荷载明显高于斜裂缝出现时的荷载. 梁 LC-2.0-0, LR-2.0-1, LR-1.5-0.7, LR-1.5-1, LR-2.5-1, LC-2.5-0 的破坏都可归为这一类.

(3) 斜拉破坏. 当剪跨比  $\lambda \geq 3.0$  时, 梁发生斜拉破坏. 这种破坏的特点是斜裂缝一旦出现后, 很快延伸到梁顶, 把梁拉裂成两部分, 破坏与临界斜裂缝的出现几乎同时发生. 斜拉破坏的原因是由于混凝土余留截面上剪应力的上升, 使截面上主拉应力超过了混凝土的抗拉强度. 梁 LR-3.0-1, LC-3.0-0 属于此类破坏.

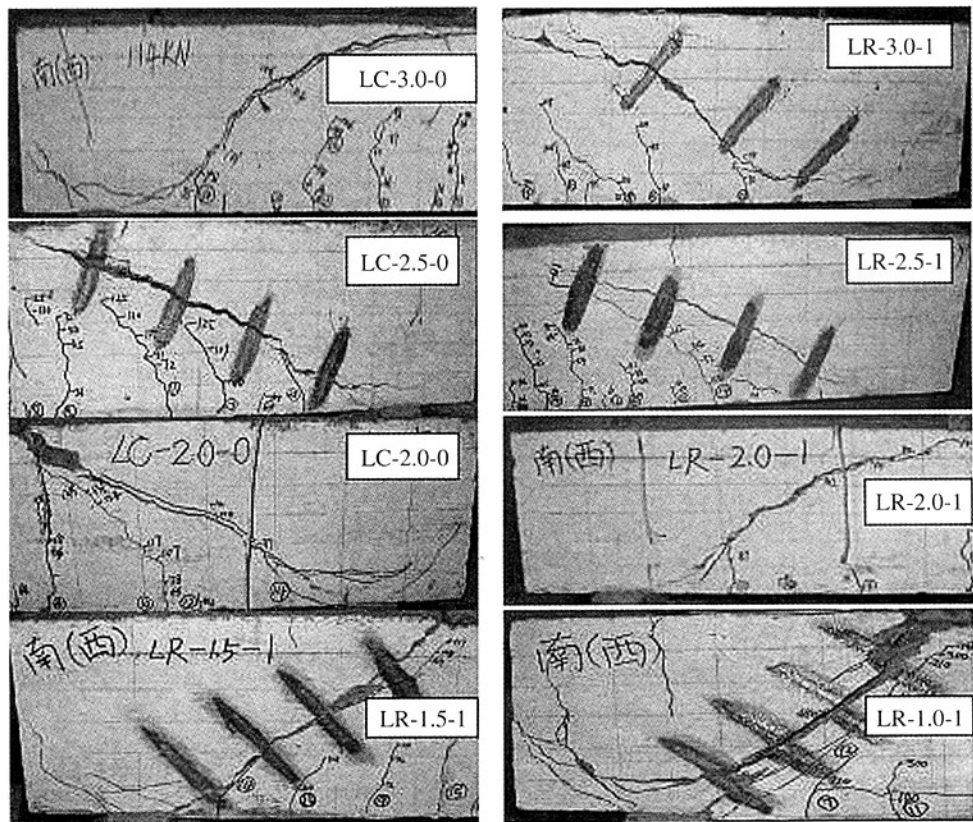


图3 部分试验梁的破坏形态

Fig.3 Failure modes of a proportion of beams

3 试验结果及分析

3.1 主要试验结果

本次试验所得到的再生混凝土梁和普通混凝土

土梁的斜截面受力性能试验结果列于表 2.表中,  
 $f_{cu}$ 为 150 mm 边长立方体抗压强度, $f_t$  为 150 mm  
边长立方体劈拉强度.

表 2 试验梁的试验结果

Tab.2 Experimental results of beams

试件编号	$b/$ mm	$h/$ mm	$h_0/$ mm	梁静跨	剪跨	$f_{cu}/$ MPa	$f_t/$ MPa	纵向配 筋率	再生骨 料取代 率/%	开裂荷 载/kN	极限荷 载/kN	实测抗 剪强度 /kN	计算抗 剪强度 /kN	破坏 形态
LC-3.0-0	151	300	262.5	2 100	3.0	30.7	3.0	2.49	0	50	114	57.0	56.8	斜拉
LR-3.0-1	154	300	262.5	2 100	3.0	34.1	3.1	2.49	100	40	119	59.5	48.3	斜拉
LC-2.5-0	153	302	264.5	2 100	2.5	30.5	2.6	2.49	0	72	135	67.5	63.4	剪压
LR-2.5-1	152	307	269.5	2 100	2.5	29.6	2.7	2.49	100	63	133	66.5	53.4	剪压
LC-2.0-0	152	305	267.5	1 700	2.0	38.7	3.2	2.49	0	77	180	90.0	104.8	剪压
LR-2.0-1	151	305	267.5	1 700	2.0	33.8	2.8	2.49	100	73	140	70.0	72.3	剪压
LC-1.5-0	152	309	271.5	1 700	1.5	35.4	3.2	2.49	0	149	377	188.5	161.6	剪压
LR-1.5-1	153	306	268.5	1 700	1.5	30.9	2.9	2.49	100	110	267	133.5	115.5	剪压
LC-1.0-0	153	308	270.5	1 700	1.0	28.7	2.8	2.49	0	150	530	265.0	286.9	斜压
LR-1.0-1	154	306	268.5	1 700	1.0	30.9	2.8	2.49	100	120	509	254.5	226.8	斜压
LR-1.5-0.3	153	306	268.5	1 700	1.5	32.4	2.8	2.49	30	100	336	168.0	131.1	剪压
LR-1.5-0.5	152	308	270.5	1 700	1.5	33.3	3.0	2.49	50	105	350	175.0	134.6	剪压
LR-1.5-0.7	152	307	269.5	1 700	1.5	30.4	2.8	2.49	70	112	300	150.0	118.0	剪压

3.2 荷载-跨中挠度曲线

图 4(a)和图 4(b)分别给出了再生骨料取代  
万方数据

率变化和剪跨比变化系列试验梁的荷载-跨中挠  
度曲线.从图中可以看出,从加载开始到第一条斜

裂缝的出现,荷载-挠度曲线呈线弹性,斜截面开裂后,曲线进入非线性阶段.在相同荷载作用下,跨中挠度随着再生骨料取代率的增加有所增加,表明随着再生骨料的增加,梁的抗弯刚度有所降低.图4(b)表明,在同一荷载下,再生混凝土梁跨中挠度随着剪跨比的增大而增大.

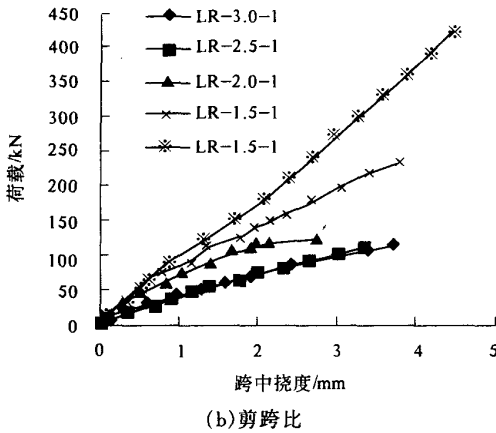
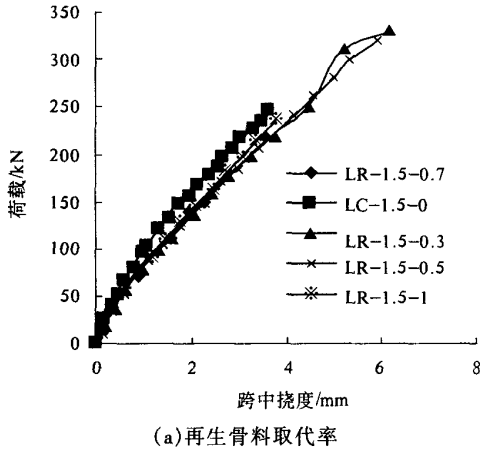


图4 再生混凝土梁荷载-挠度曲线

Fig.4 Load - deflection curves of recycled concrete beam

### 3.3 荷载-纵筋应变曲线

从图5(a)给出的 LR-2.0-1 荷载-钢筋应变曲线可以看出,刚开始加载时,由于纯弯段的弯矩最大,所以跨中钢筋的应变最大;但随着荷载的增大,剪跨段开始出现斜裂缝,这时裂缝所在位置的钢筋应变明显增加.图5(b)给出的 LR-1.5-0.5 荷载-钢筋应变曲线也表明,加载初期纯弯段的钢筋应变较大,而到加载的中后期,剪跨段钢筋应变的发展速度要比纯弯段纵筋应变快许多并且超过了纯弯段的纵筋应变.剪跨段和纯弯段纵筋的应变在某种程度上体现了剪跨段和纯弯段裂缝的开裂过程.

万方数据

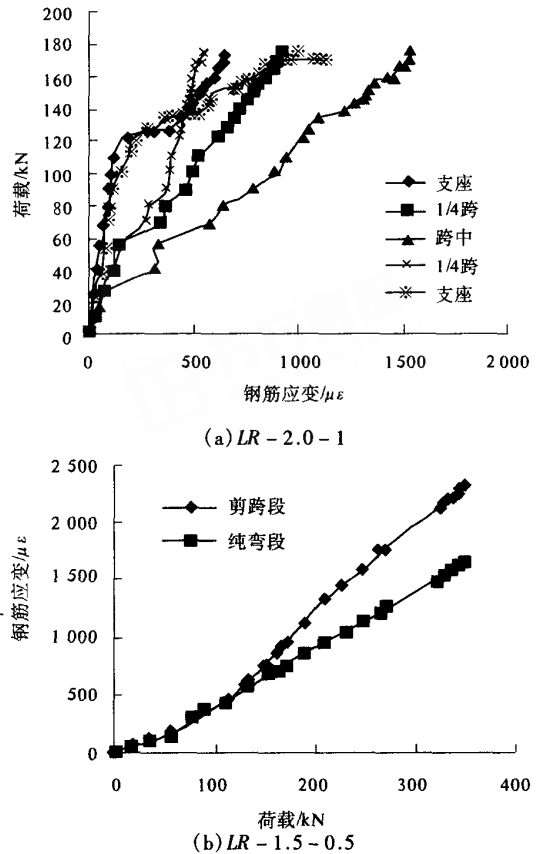


图5 荷载-钢筋应变曲线对比

Fig.5 Comparison of load - strain curves

### 3.4 荷载-斜裂缝平均宽度曲线

图6给出了 LR-1.0-1 和 LC-1.0-0 荷载-斜裂缝平均宽度曲线,可以看出,在相同荷载作用下,再生混凝土梁的斜裂缝平均宽度要比普通混凝土梁的斜裂缝宽度大.图7给出了不同再生骨料取代率时斜裂缝平均宽度的对比,随着再生骨料取代率的增加,斜裂缝平均宽度有所增大.取代率为30%时斜裂缝平均宽度与普通混凝土梁斜裂缝平均宽度基本相同.

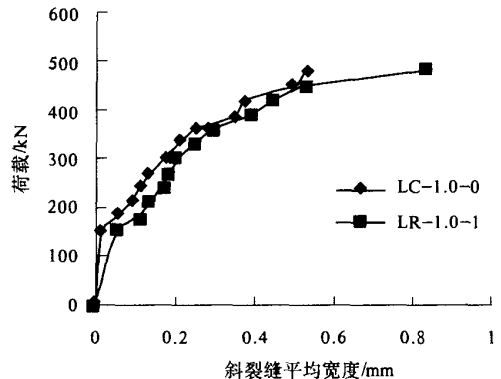


图6 梁荷载-斜裂缝平均宽度曲线

Fig.6 Load - mean width of diagonal crack curves



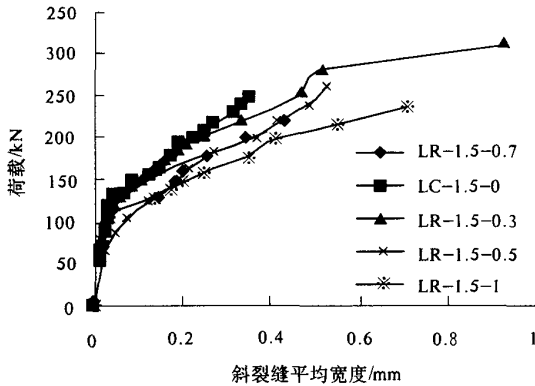


图7 再生骨料取代率对荷载-斜裂缝平均宽度曲线影响

Fig.7 Effect of replacement ratio on load-mean width of diagonal crack curves

#### 4 再生混凝土梁斜截面承载力计算方法

根据试验结果,再生混凝土梁与普通混凝土梁的破坏形态相似,故可参照普通混凝土梁破坏时的受力状态来分析再生混凝土梁的抗剪机理。根据极限平衡理论,再生混凝土梁无腹筋梁斜截面的剪力是由剪压区混凝土所承担的剪力  $V_c$ 、裂缝间的骨料咬合力的垂直方向的分力  $V_a$  和纵筋的销栓力  $V_d$  组成的,即再生混凝土梁无腹筋的受剪承载力  $V_u$  为:  $V_u = V_c + V_a + V_d$ 。文献[6]的研究表明,由于再生粗骨料的空隙率较大,其在破碎过程中不可避免的要产生微裂缝,其在临界斜裂缝处容易被拉断,再生混凝土梁的骨料咬合力要比普通混凝土梁小。图8给出了再生混凝土梁与普通混凝土梁相对受剪承载力的对比曲线,由图可知,除剪跨比为1.5时再生混凝土梁与普通混凝土梁受剪承载力有较大差别外,其他均相差不大。图9给出了再生混凝土梁随再生骨料取代率的变化时受剪承载力变化曲线。

文献[7,8]中已论证了在集中荷载下,梁的抗剪承载力随剪跨比的增大而降低。因此,我们假定普通混凝土无腹筋梁的抗剪承载力表达形式为

$$V_c = \frac{a}{b + \lambda} f_t b h_0 \quad (1)$$

(1) 对普通混凝土无腹筋梁抗剪承载力试验结果的回归分析:用本次试验中的5根普通混凝土梁的实测数据对上式进行线性化回归拟合得:  $a = 1.2, b = -0.50$ 。即得普通混凝土无腹筋梁的抗剪承载力的回归公式为

$$V_c = \frac{1.2}{\lambda - 0.5} f_t b h_0 \quad (2)$$

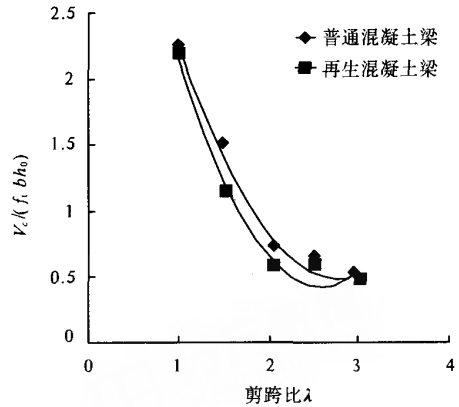


图8 梁的相对受剪承载力对比

Fig.8 The shear capacity of recycled aggregate concrete beam in comparison with the natural aggregate concrete beam

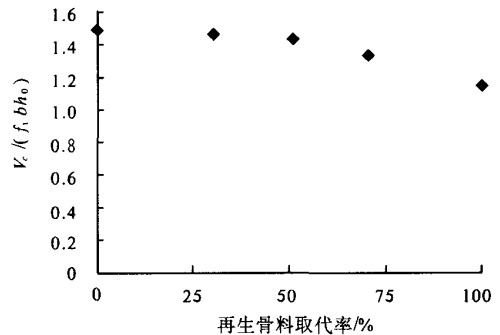


图9 再生骨料取代率对梁抗剪承载力影响

Fig.9 Effect of replacement ratio on shear capacity of recycled aggregate concrete beam

式中:  $1.0 \leq \lambda \leq 3.0$ , 当  $\lambda < 1.0$  时, 取  $\lambda = 1.0$ ; 当  $\lambda > 3.0$  时, 取  $\lambda = 3.0$ 。实测值与计算值的比值的平均值为 1.012, 变异系数为 0.054。

(2) 对再生混凝土无腹筋梁抗剪承载力试验结果的回归分析:用本次试验中的5根再生混凝土梁的实测数据对上式进行回归计算得:  $a = 0.98, b = -0.50$ 。即得再生混凝土无腹筋梁的抗剪极限承载力的回归公式为

$$V_r = \frac{0.98}{\lambda - 0.5} f_t b h_0 \quad (3)$$

式中:  $1.0 \leq \lambda \leq 3.0$ , 当  $\lambda < 1.0$  时, 取  $\lambda = 1.0$ ; 当  $\lambda > 3.0$  时, 取  $\lambda = 3.0$ 。实测值与计算值的比值的平均值为 1.134, 变异系数为 0.047。

(3) 再生混凝土梁随再生骨料取率变化抗剪承载力试验结果的回归分析:由图9可知,再生混凝土梁随再生骨料取代率的增加抗剪承载力近似于线性减小,故假设再生混凝土梁随再生骨料取代率的抗剪承载力计算公式为

$$\frac{V_{cr}}{f_t b h_0} = (1 - \alpha r) \frac{V_c}{f_t b h_0} \quad (4)$$

式中:  $r$  为再生骨料取代率, %;  $\alpha$  为再生混凝土梁抗剪极限承载力降低系数;  $V_{cr}$  为取代率不同时再生混凝土梁抗剪极限承载力;  $V_c$  为普通混凝土梁抗剪极限承载力。

用本次试验再生骨料取代率不同时梁的实测值对上式进行回归计算, 偏于安全的取  $\alpha = 0.1$ 。再由公式(2)得出再生混凝土梁随再生骨料取代率不同时抗剪极限承载力的计算公式为:

$$V_{cr} = \frac{1.2(1 - 0.1r)}{\lambda - 0.5} f_t b h_0 \quad (5)$$

由公式(2)、(3)、(5)计算的梁的极限承载力  $V_{计}$  与实测结果  $V_{测}$  对比见表2。

## 5 结论

通过13根普通混凝土与再生混凝土无腹筋梁在集中荷载作用下抗剪强度的对比试验研究和试验结果的整理分析, 可以得出如下主要结论:

(1) 再生混凝土梁与普通混凝土梁的破坏形式差别不大, 主要与剪跨比有关, 剪跨比  $\lambda = 1$  时发生斜压破坏,  $1 < \lambda < 3$  时发生剪压破坏,  $\lambda \geq 3.0$  时发生斜拉破坏。

(2) 随着再生骨料取代率的增加, 相同荷载作用下再生混凝土梁的跨中挠度变大, 说明随着再生骨料的增加, 再生混凝土梁的抗弯刚度有所减小。

(3) 再生混凝土梁斜截面开裂荷载稍小于普通混凝土梁, 其斜裂缝平均宽度比普通混凝土梁大。

(4) 再生混凝土梁的抗剪承载力随着剪跨比的增大而减小, 再生混凝土梁抗剪承载力公式可按(3)式进行估算。

(5) 再生混凝土梁的抗剪承载力随着再生骨料的取代率增加而减小, 抗剪承载力与再生骨料取代率近似于线性关系。式(5)给出了再生骨料取代率不同时再生混凝土梁的计算公式。

(6) 本试验所用再生骨料为试验室废弃混凝土块破碎而成, 龄期为2~3年, 对于采用龄期为40~50年的废弃混凝土骨料的制作的再生混凝土梁抗剪性能如何, 有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 罗 蓉, 冯光乐, 凌天清. 再生水泥混凝土研究综述[J]. 中外公路, 2003, 23(2): 83~86.
- [2] 邢振贤, 周曰农. 再生混凝土的基本性能研究[J]. 华北水利水电学院学报, 1998, 19(2): 30~32.
- [3] 张雷顺, 王 娟, 黄秋风, 等. 再生混凝土抗冻耐久性试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(9): 64~66.
- [4] TOPCU I B. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(12): 1817~1823.
- [5] 史 巍, 侯景鹏. 再生混凝土技术及其配合比设计方法[J]. 建筑技术开发, 2001, 28(8): 18~20.
- [6] 肖建庄, 兰 阳. 再生混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 结构工程师, 2004, 20(6): 53~58.
- [7] 郑州工学院水利系结构室. 钢筋混凝土无腹筋梁抗剪性能试验报告[R]. 郑州: 郑州工学院, 1988.
- [8] 李平先, 何世玲, 郭进军, 等. 钢筋混凝土受弯构件受剪承载力统一计算[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(1): 21~24.

## Experimental Research on the Shearing Capacity of Recycled Concrete Beams Without Stirrups

ZHANG Lei - shun, ZHANG Xiao - lei, YAN Guo - xin

(School of Environment and Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In this paper, with the contrast tests of 13 recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete, the effects of replacement ratio of recycled aggregate and shear - span ratio on the characters of shear capacity and deformability are investigated. The test result shows the deflection and diagonal crack of recycled aggregate concrete are bigger than natural aggregate concrete, the shear capacity of recycled concrete beam reduces with the increase of recycled coarse aggregate content, the shear capacity reduces with the increase of shear - span ratio. Based on the result of failure by shear of recycled concrete beams and using the ultimate equilibrium theory, a formula for the shear strength of recycled concrete is recommended.

**Key words:** recycled concrete; beam; shear strength; shear capacity