

# 再生骨料混凝土板冲切性能试验

肖建庄, 周正久, 马修斯

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 以再生粗骨料取代率为主要参数, 进行了再生混凝土板的冲切试验, 分析了板在冲切荷载作用点处的荷载-中心点挠度曲线、板底钢筋应变、板顶混凝土应变、破坏形态及受冲切极限承载力等。分析结果表明: 随着再生粗骨料取代率的提高, 板在各个受力阶段的变形性能和受冲切承载力均有所降低。基于试验结果, 对普通混凝土板受冲切极限承载力计算公式进行了修正, 建立了再生混凝土板受冲切极限承载力计算公式并进行了校核, 结果可以用于再生混凝土板的抗冲切设计。

**关键词:** 再生骨料混凝土; 板; 冲切; 再生粗骨料取代率

**中图分类号:** TU528.79

**文献标志码:** A

## Test on Punching Behavior of Recycled Aggregate Concrete Slabs

XIAO Jianzhuang, ZHOU Zhengjiu, Tawana MM

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Considering the recycled coarse aggregate (RCA) replacement percentage as the main parameter, the punching test on recycled aggregate concrete (RAC) slabs was performed. The load-displacement curve at the point of punching load, the strain of bottom steel bars, the strain of top concrete, the failure pattern and the punching bearing capacity were studied. Analysis results indicate that: with the increase of RCA replacement percentage, the deformation in each loading stage and the punching bearing capacity of the RAC slabs are reduced. Finally, the formula for punching bearing capacity of natural aggregate concrete slabs was modified and a new punching capacity formula of RAC slabs was proposed based on this test, which can be applied in the punching design of RAC slabs.

**Key words:** recycled aggregate concrete; slab; punching; replacement percentage of recycled coarse aggregate

对于普通混凝土板冲切性能, Talbot<sup>[1]</sup>早在 20 世纪初就开展了有关试验, 并提出了受冲切承载力计算公式。进入 20 世纪 40 年代后期, 国外专家学者相继进行了进一步试验研究<sup>[2-4]</sup>。从 20 世纪 70 年代末期开始, 国内学者开始对冲切问题进行理论分析和试验研究<sup>[5-7]</sup>, 这些研究作为普通混凝土板的抗冲切设计提供了基础。

近几年, 再生混凝土技术发展迅速, 有关再生混凝土材料性能的研究已取得一定成果<sup>[8]</sup>, 并在梁、柱等结构构件的抗弯、抗剪方面有了较好的研究进展<sup>[9-10]</sup>。针对再生混凝土板冲切性能的研究刚刚起步<sup>[11-12]</sup>, 研究内容仅局限在冲切破坏分析方面, 并没有从再生混凝土材料自身的特性和板的变形性能等方面去研究板的冲切破坏及其计算方法。为此, 本文开展了再生混凝土板冲切性能试验, 着重分析再生粗骨料取代率对板冲切破坏形态、变形能力及冲切承载力的影响。希望为再生混凝土板冲切性能的深入研究和设计提供一定依据。

## 1 试验设计

### 1.1 再生混凝土原材料

水泥采用海螺牌水泥 PO42.5 级普通硅酸盐水泥, 各项技术指标符合《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥质量标准》(GB175—1999)。细骨料为中砂, 具体指标见表 1, 各项技术指标符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ52—2006)的要求。

表 1 细骨料(中砂)基本指标

Tab. 1 The properties of fine aggregate (medium sand)			
表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含泥量/%	细度模数
2 670	1 420	0.9	2.7

试验用粗骨料包括天然碎石(天然粗骨料)与再生粗骨料。再生粗骨料的原始混凝土强度等级约为

C30,经机械破碎、筛分,5~15 mm 和 15~25 mm 再生粗骨料按质量比 2:1 混合,得到能满足级配要求的 5~25 mm 再生粗骨料(级配如图 1 所示),再生粗骨料的基本指标见表 2。拌合水为自来水。

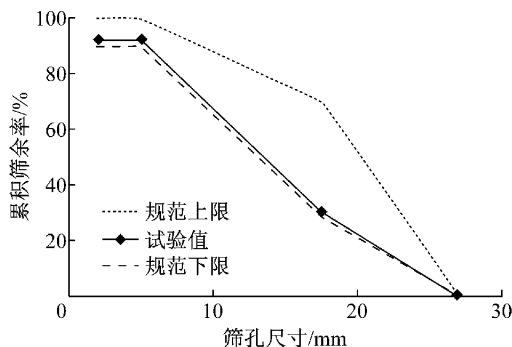


图 1 再生粗骨料颗粒级配

Fig.1 Recycled coarse aggregate particle size distribution

表 2 再生粗骨料基本指标

Tab.2 The properties of recycled coarse aggregates

堆积密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	吸水率/ %	含泥量/ %	压碎指标/ %
1 460	2 514	3.6	3.8	13.7

## 1.2 再生混凝土与钢筋力学性能

再生混凝土配合比见表 3,其中,水泥、水、砂质量分别为 433 kg,210 kg,630 kg。立方体试块边长为 100 mm;棱柱体试块长、宽、高分别为 100 mm,100 mm,300 mm。试块均在自然条件下养护 28 d,抗压强度(已经考虑尺寸换算系数 0.95)及弹性模量实测值见表 4。试验板中受力钢筋为 HRB335,直径为  $\phi 12$ ,屈服强度平均值为 334.69 MPa,弹性模量为  $2.00 \times 10^5$  MPa,钢筋屈服应变约为  $1.674 \times 10^{-6}$ 。

表 3 再生混凝土配合比

Tab.3 Recycled aggregate concrete mixing ratio

试件编号	天然粗骨料	再生粗骨料	( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 附加水
RAC0	1 173	0	0
RAC30	819	351	17.55
RAC50	587	587	29.35
RAC100	0	1 173	58.65

## 1.3 试件设计

试验共设计 4 块板,板的长、宽、高分别为 1 500 mm,1 500 mm,120 mm,板厚  $h=120$  mm,有效高度  $h_0=99$  mm,在板底配双向钢筋网,单向配筋率为  $\rho=1.142\%$ 。板施工图如图 2 所示。

## 1.4 加载装置与测试内容

试验加载装置如图 3,通过一方钢管混凝土短柱施加集中荷载,板四周简支于混凝土框架梁上。测试

表 4 再生混凝土 28 d 抗压强度及弹性模量

Tab.4 The 28 d compressive strength and elastic modulus of recycled concrete

试件编号	抗压强度/MPa		弹性模量/( $\times 10^4$ MPa)
	立方体	棱柱体	
RAC0	52.25	39.9	3.73
RAC30	44.65	31.4	3.50
RAC50	38.95	33.3	2.96
RAC100	37.05	28.5	2.74

内容包括:钢筋的应变、混凝土的应变、板竖向挠度以及加载过程中试件开裂和破坏过程。如图 4 所示,为了更全面地观测和分析加载过程中钢筋和混凝土应力的变化情况,每块板中均布置了 5 个钢筋应变片和 6 个混凝土应变片。其中,钢筋应变片之间的距离均为 200 mm,标号为 S-1—S-5;混凝土应变片主要分为平行于板边和与板边成  $45^\circ$  夹角布置 2 种,标号为 C-1—C-6。每块板试件中位移传感器(LVDT)均布置了 8 个,标号为 D-1—D-8,其中板面布置了 6 个,板底布置了 2 个(即图中的 D-5 号和 D-8 号位移传感器),如图 5 所示。

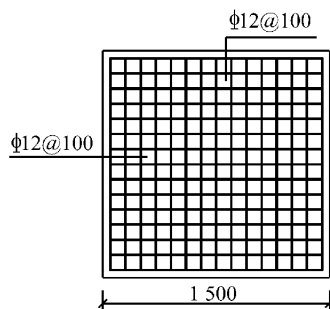


图 2 板的平面尺寸及其配筋(单位:mm)

Fig.2 Slab size and its reinforcements (unit: mm)

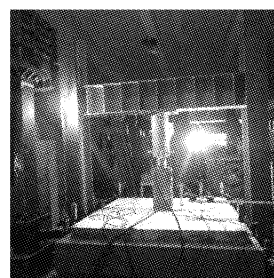


图 3 试验加载装置

Fig.3 The test loading setup

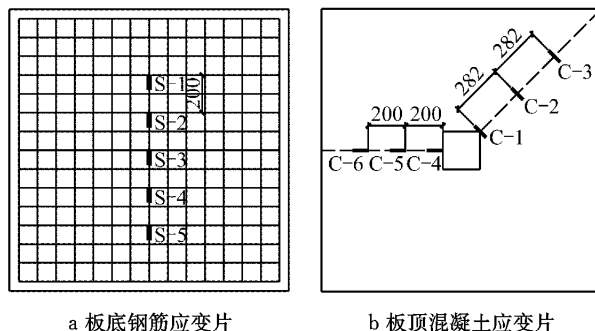


图 4 应变片布置(单位:mm)

Fig.4 The arrangement of strain gauges(unit: mm)

采用分级加载,按荷载控制的加载方案进行。在开裂荷载前按 20 kN 加载,之后按 50 kN 加载直至破坏。为了保证数据采集的稳定,试验过程中加卸载速度保持匀速,使试件的变形得到充分发展。

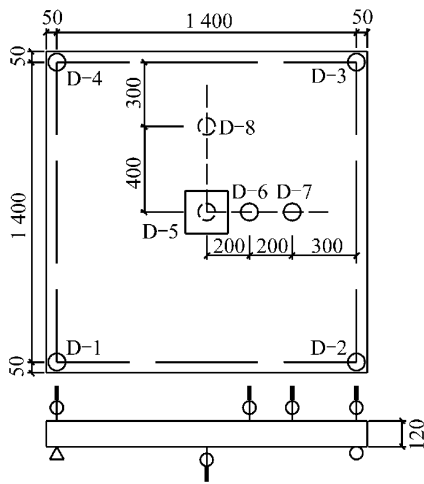


图5 位移传感器布置(单位:mm)

Fig.5 The arrangement of LVDTs(unit: mm)

## 2 主要试验结果

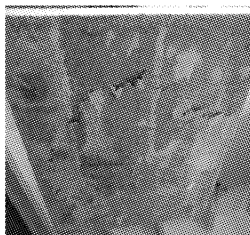
### 2.1 试验现象与破坏特征

加载初期,板面混凝土没开裂,板试件处于弹性工作阶段.随着荷载增加,在板受拉面对应于加载短柱的柱周位置处首先出现微小裂缝;继续加载,裂缝沿柱周连通,并向外发展为垂直于板边的径向裂缝;随后径向裂缝曲折向板角部发展;在荷载继续施加的过程中,由柱周范围向外又相继出现多道板面环向裂缝;至约  $0.8P_u$  ( $P_u$  为极限荷载) 时,板面对角裂缝基本形成,但因塑性铰线发展不完全,试件并未形成几何可变的机构而产生弯曲破坏;在  $0.8P_u \sim P_u$  的加载段中,板的荷载-中心挠度曲线发生明显偏向挠度轴的弯曲,板受力达到冲切极限荷载,随着冲切锥体的冲出与发出声音<sup>[13]</sup>,板发生了冲切破坏.

板冲切破坏照片见图6,随着再生粗骨料取代率的提高,冲切破坏时板面完整性降低,且板面冲切锥体局部脱落现象明显.

### 2.2 冲切破坏荷载及挠度

板的冲切破坏荷载及破坏时中心的挠度如表5,可知,随着再生粗骨料取代率从0增至30%增至50%再增至100%,板破坏时最大破坏荷载值均逐渐



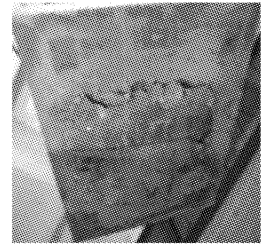
a RAC0



b RAC30



c RAC50



d RAC100

图6 试验板冲切破坏照片

Fig.6 The punching failure photos of test slabs

表5 板的冲切破坏荷载及挠度

Tab.5 Punching failure load and deflection of slabs

试件编号	冲切破坏荷载/kN	冲切破坏挠度/mm
RAC0	320.0	29.28
RAC30	313.4	22.59
RAC50	307.1	22.34
RAC100	303.4	23.48

减小;除了再生粗骨料取代率为100%的试验板外,冲切破坏时板中心挠度值均呈逐渐减小的趋势.考虑到再生粗骨料取代率为100%的再生混凝土材料的随机性较普通混凝土及取代率较低的再生混凝土大<sup>[8]</sup>,板发生冲切破坏时中心挠度值略微增加.

## 3 试验分析

### 3.1 钢筋应变

板中受力钢筋的应变发展情况如图7a—7d所示.加载初期,随着荷载的增加,板底纵筋中的应力很小,主要由板底受拉区混凝土承受拉应力;达开裂荷载后,受拉区混凝土逐渐退出工作,板底纵筋应力开始明显增加;随着荷载继续增加,钢筋应力呈非线性增加;直至冲切锥体形成,板底钢筋应力增加开始变缓,破坏时多数测点未达到钢筋的屈服应变.

选取板中心处的S-3号钢筋应变片数据进行对比,如图7e.由图7e可见,加载过程中,钢筋应变的发展速率随再生粗骨料取代率的增加而呈逐渐提高的趋势,这是由于随着再生粗骨料取代率的增加,混凝土弹性模量降低,板底纵筋更多地参与受力,导致应变发展速率呈逐步提高的趋势.

### 3.2 混凝土应变

板面混凝土的应变分析结果如图8a~8d所示.加载初期,随着荷载的增加,板中混凝土应力基本呈线性缓慢增加;继续加载,混凝土应变曲线开始偏向应变轴,应变增加速率变大,且板角方向的混凝土应变发展速率明显快于平行于板边方向的混凝土应变发展速率.由图8a中混凝土应变曲线可知,在冲切

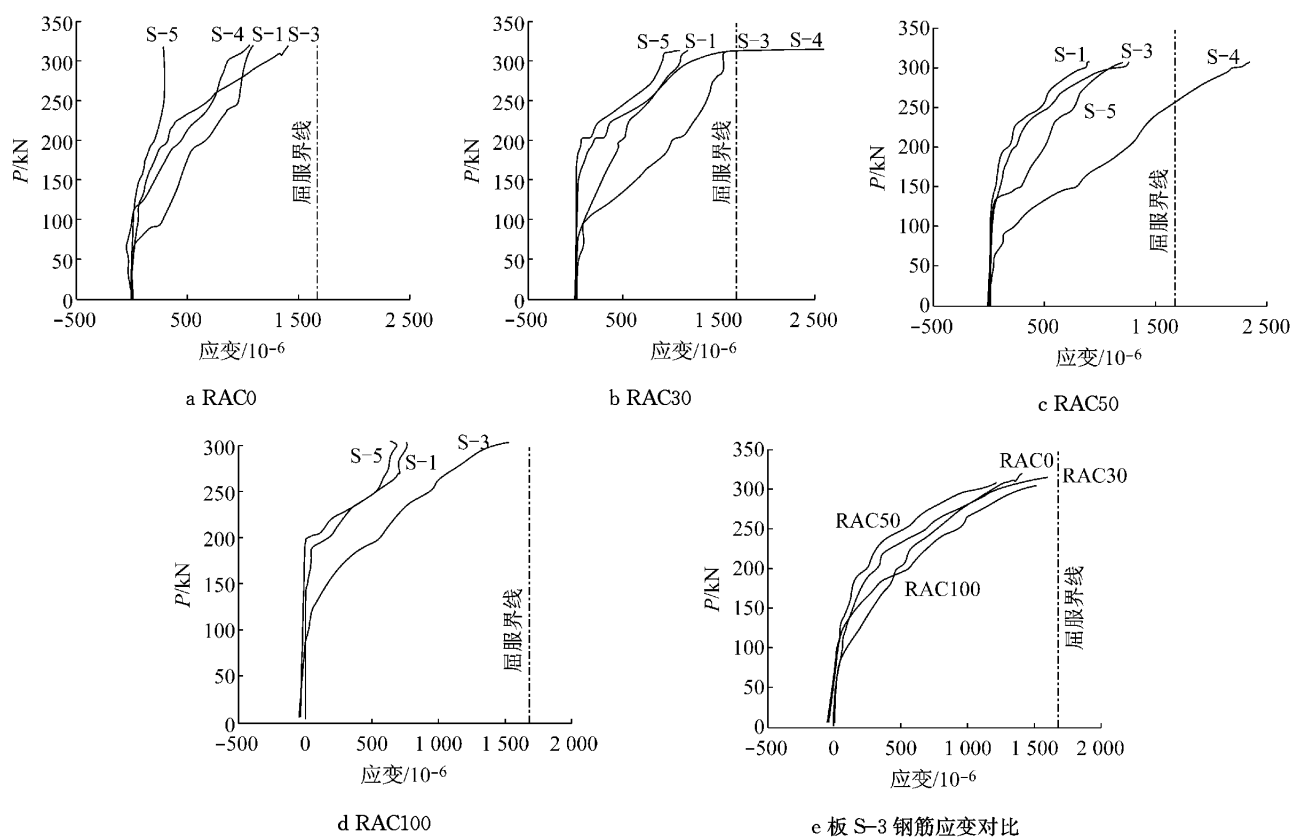


图 7 板荷载与钢筋应变的关系

Fig.7 Relationship between slab's load and reinforced bar strain

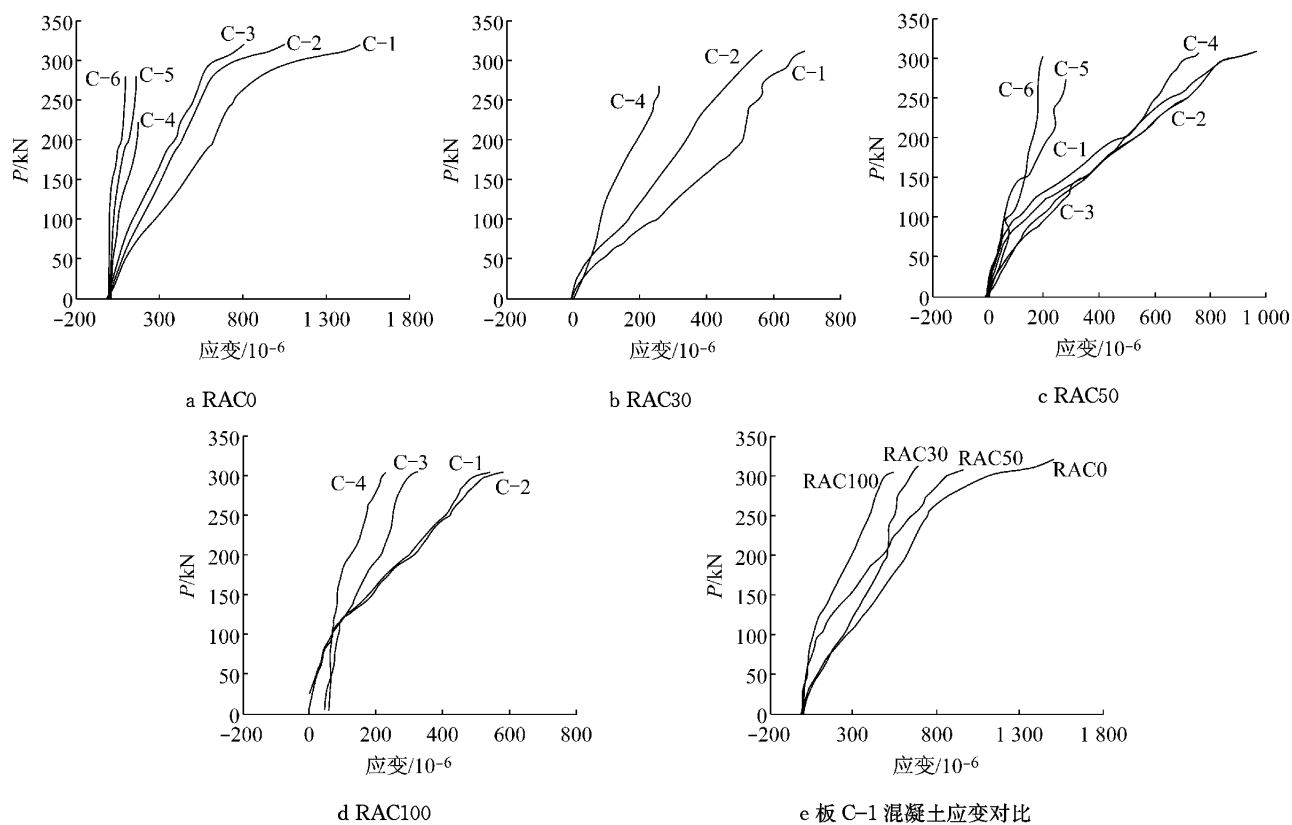


图 8 板面混凝土荷载与应变的关系

Fig.8 Relationship between slab surface's concrete load and strain

锥体范围内,板面普通混凝土 C-1 应变( $1\ 503 \times 10^{-6}$ )近似达到峰值应变值( $1\ 500 \times 10^{-6} \sim 2\ 000 \times 10^{-6}$ ).考虑到再生混凝土材料的变异性 and 脆性高于普通混凝土<sup>[8]</sup>,所以在板面再生混凝土未充分发挥其抗压强度前即发生了脆性的冲切破坏,如图 8b~8d.

由图 8a 可知,板冲切破坏的发生并不简单是板顶混凝土达到抗压强度引起.关于板的冲切,存在着斜拉破坏和剪压破坏 2 种破坏模式的争议.例如 Moe<sup>[3]</sup>认为冲切破坏实质上是剪压破坏;周克荣<sup>[14]</sup>通过有限元法分析了斜锥面上的混凝土应力分布特点,认为板柱节点试件是在斜锥面上压应力和剪应力以及环向压应力的复合作用下达到极限承载能力而发生冲切破坏的.本文通过对板破坏时混凝土的应变分析,认为普通混凝土板发生冲切破坏主要是剪压破坏所致;结合板底钢筋的应变发展,再生混凝土板则趋向于斜拉破坏.

选取板面对应于加载短柱角处的 C-1 号混凝土应变片数据进行分析,如图 8e 所示.由图 8e 可见,随着再生粗骨料取代率的提高,板发生冲切破坏时板面混凝土应变值总体呈逐渐降低的趋势.这主要是因为再生粗骨料取代率的提高使混凝土材料脆性增加所致.

### 3.3 荷载-中心挠度曲线

混凝土冲切板的荷载-中心挠度( $P-\Delta$ )曲线反映了板在承载力、变形等方面的性能.根据试验板中心点的挠度测点 D-5 和四边简支支座处的挠度修正可以得出各试件中心处的  $P-\Delta$  曲线,如图 9 所示.

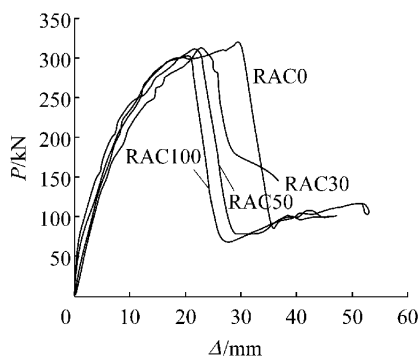


图 9 荷载-中心挠度曲线  
Fig.9 Load-displacement curve

从图 9 可见,随着再生粗骨料取代率从 0 增至 30%增至 50%再增至 100%,板均发生了剪切型冲切破坏;即在荷载较小时,板基本上处于弹性工作阶段;达到开裂荷载以后,板的变形曲线开始偏离荷载

轴,但  $P-\Delta$  曲线仍然近似呈线性变化;至 85% $P_u$  左右时,曲线逐渐偏向挠度轴;达到极限荷载时,冲切锥体形成,荷载大幅下降;之后荷载逐渐稳定在极限荷载值的 25%~35%,板的变形在这相对稳定的残余荷载作用下继续发展,直到板最终失去承载力.与普通混凝土相比,随着再生粗骨料取代率的提高,板冲切锥形成时的变形值减小,最终破坏时的变形能力明显降低.

### 3.4 冲切板的变形能力和耗能能力

一般位移延性系数的表达式为  $\mu_\Delta = \Delta_0 / \Delta_y$ ,其中  $\Delta_0$  为极限荷载所对应的挠度,  $\Delta_y$  为构件屈服时对应的挠度.然而对于发生冲切破坏的板,板中纵向受拉钢筋屈服与否和板破坏形式没有必然联系,而冲切破坏后板的承载能力骤然下降,因此其“延性”的定义需要作必要修正,本文称之为“等效延性”.为了定量描述冲切板的等效延性,对极限荷载  $P_u$  对应的挠度  $\Delta_0$  与按能量法确定的名义屈服挠度  $\Delta_y$  的比值进行了计算,确定  $\Delta_y$  的原理如图 10 所示,将实测  $P-\Delta$  曲线的上升段以理想弹塑性直线段代替,两者与变形轴所围面积大致相等,两直线段交点所对应的挠度值即为所求的  $\Delta_y$ <sup>[15]</sup>.  $P-\Delta$  曲线(图 10)中延性折线图与横轴所围面积值即为吸收的能量  $S_\Delta$ .

计算得到的等效位移延性系数和吸收的能量见表 6.可以发现,随着再生粗骨料取代率的提高,等效位移延性系数和板冲切破坏时吸收能量的能力均逐渐降低.

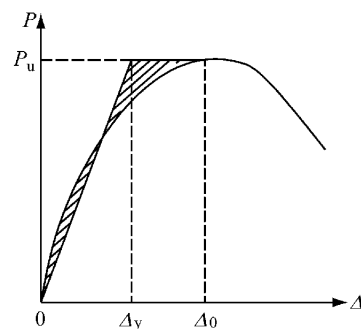


图 10 屈服位移  
Fig.10 The yield displacement

表 6 板的等效位移延性系数及吸收的能量

Tab.6 Equivalent displacement ductility factor and energy absorption of slabs

试件编号	等效延性系数	$S_\Delta / (\text{kN} \cdot \text{m})$
RAC0	1.77	6.621 0
RAC30	1.72	5.050 4
RAC50	1.71	4.852 0
RAC100	1.65	4.350 4

## 4 冲切承载力计算分析

按照《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010),不配置箍筋或弯起钢筋板的受冲切承载力按下式计算:

$$F_1 \leq (0.7\beta_h \cdot f_t) \cdot \eta \cdot \mu_m \cdot h_0 \quad (1)$$

式中:  $\beta_h$  为截面高度影响系数;  $f_t$  为混凝土的抗拉强度值;  $\eta = \min \left\{ 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s}, 0.5 + \frac{\alpha_s \cdot h_0}{4\mu_m} \right\}$ , 其中  $\beta_s$  为局部荷载作用面积, 为矩形时的长边与短边尺寸的比值,  $\alpha_s$  为柱位置影响系数;  $h_0$  为板的有效高度;  $\mu_m$  为计算截面周长。

按照规范的有关规定, 取  $\beta_h = 1$ ,  $\eta = 1$ ,  $\alpha_s = 40$ ,  $h_0 = 99$  mm; 对于再生混凝土, 抗拉强度  $f_t = f_{sp} \approx 0.24 \cdot f_{cu}^{0.65}$  [8] (其中  $f_{sp}$  为立方体试块劈裂抗拉强度,  $f_{cu}$  为立方体试块抗压强度), 则按式(1)可计算出各块板的受冲切极限承载力, 见表 7。从表 7 可知, 与普通混凝土相比, 采用现行规范计算再生混凝土板受冲切承载力时安全储备降低。从结构设计的安全性角度考虑, 公式的计算值  $P_{u,cal}$  应小于试验值  $P_u$ , 采用现行规范计算普通混凝土的  $P_{u,cal}/P_u$  约为 0.676, 抗冲切安全储备高。为了安全应用再生混凝土, 基于本次试验, 考虑折减系数取值为 0.65, 其计算结果见表 8。由表 8 可知, 当折减系数为 0.65 时, 对于再生混凝土板受冲切承载力计算公式的  $P_{u,cal}/P_u$  均值约为 0.614, 方差约为 0.021。故本文建议在式(1)的基础上乘以折减系数 0.65。

表 7 再生混凝土板受冲切承载力计算结果

Tab. 7 Punching capacity calculation of recycled concrete slabs

试件编号	$f_{cu}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	$\mu_m/\text{mm}$	$P_{u,cal}/\text{kN}$	$P_u/\text{kN}$	$P_{u,cal}/P_u$
RAC0	52.25	1 592	216.24	320.0	0.676
RAC30	44.65	1 592	312.80	313.4	0.998
RAC50	38.95	1 592	286.23	307.1	0.932
RAC100	37.05	1 592	277.08	303.4	0.913

表 8 再生混凝土板受冲切承载力修正后计算结果

Tab. 8 Revised punching capacity calculation of recycled concrete slabs

试件编号	$f_{cu}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	$\mu_m/\text{mm}$	$P_{u,cal}/\text{kN}$	$P_u/\text{kN}$	$P_{u,cal}/P_u$
RAC0	52.25	1 592	216.24	320.0	0.676
RAC30	44.65	1 592	201.21	313.4	0.642
RAC50	38.95	1 592	186.11	307.1	0.606
RAC100	37.05	1 592	179.92	303.4	0.593

## 5 结语

(1) 再生混凝土板的受冲切承载能力比普通混

凝土板的受冲切承载能力略有降低。

(2) 再生混凝土板冲切极限承载能力、变形能力及耗能能力均随着再生粗骨料取代率的提高而呈下降的趋势。

(3) 结合板底钢筋应变和板顶混凝土应变发展规律, 普通混凝土板的冲切破坏主要是由剪压区混凝土压坏所致, 而再生混凝土板的冲切破坏趋向于斜拉破坏。

(4) 基于本文的试验结果, 计算再生混凝土板的受冲切极限承载力, 建议在现行普通混凝土规范公式的基础上考虑乘以折减系数 0.65。

### 参考文献:

- [1] Talbot A N. Reinforced concrete wall footings and column footings[R]. Urbana: University of Illinois, 1913.
- [2] Richard C Elstner, Hognestad Eivind. Shearing strength of reinforced concrete slabs [J]. ACI Structural Journal, 1956, 53(7):29.
- [3] Moe J. Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads [R]. Chicago: Portland Cement Association, 1961.
- [4] Marzouk H, Hussein A. Experimental investigation on the behavior of high-strength concrete slabs [J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(6):701.
- [5] 郑作樵, 欧阳成生. 钢筋混凝土圆板的冲切强度 [J]. 建筑结构学报, 1985, 6(6):12.  
ZHENG Zuoqiao, OUYANG Chengsheng. Punching strength of reinforced concrete circular slabs [J]. Journal of Building Structures, 1985, 6(6):12.
- [6] 郑作樵. 考虑弯曲影响的钢筋混凝土板冲切强度 [C]//第二届学术讨论会论文集. 北京: 清华大学, 1990:501-508.  
ZHENG Zuoqiao. The punching strength of reinforced concrete slabs with consideration of the bending impaction [C]// Proceedings of the Second Symposium. Beijing: Tsinghua University, 1990:501-508.
- [7] 张元伟. 钢筋混凝土板抗冲切试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.  
ZHANG Yuanwei. Experimental study on punching shear of reinforced concrete slabs [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [8] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [9] Choi W C, Yun H D, Kim S W. Flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(9):887.
- [10] 肖建庄, 黄一杰. GFRP 管约束再生混凝土柱抗震性能与损伤评价 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (11): 112.  
XIAO Jianzhuang, HUANG Yijie. On the seismic behavior and damage assessment of recycled aggregate concrete filled GFRP tube column [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (11): 112.

(下转第 53 页)