

# Research on the Bending Ductility of Machine-made Sand Recycled Concrete Beams

Jianwei Feng

Southwest Transportation Construction Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650500, China

## Abstract

Recycled concrete made of manufactured sand, as a new type of engineering material, has attracted increasing attention. This paper mainly studies the bending ductility performance and ultimate bearing capacity of machine-made sand recycled concrete beams, and explores the influence of the substitution rate of coarse aggregates and the content of machine-made sand in machine-made sand recycled concrete on the bending ductility performance of the beams. The finite element method was adopted to conduct numerical simulation and analysis on two groups of machine-made sand recycled concrete beams with different parameters. Research shows that under the condition of the same content of manufactured sand, both the ultimate bearing capacity and the bending ductility coefficient of the beam decrease with the increase of the substitution rate of coarse aggregates. The ductility of the manufactured sand recycled concrete beam with a substitution rate of 100% is 35% lower than that of the manufactured sand concrete beam. Under the condition of the same substitution rate of coarse aggregates, the content of manufactured sand has no significant effect on the ultimate bearing capacity and bending ductility of beams. The ductility coefficient of beams with different contents of manufactured sand is close to 14, and manufactured sand can well replace natural sand. This study provides theoretical support for understanding the mechanical properties of machine-made sand recycled concrete beams and their applications in engineering.

## Keywords

Bending ductility Model test Machine-made sand recycled concrete beam Substitution rate of coarse aggregates Content of manufactured sand

## 机制砂再生混凝土梁弯曲延性研究

冯建伟

西南交通建设集团有限公司, 中国·云南 昆明 650500

## 摘要

机制砂再生混凝土作为一种新型工程材料, 越来越受到了人们关注。本文主要研究机制砂再生混凝土梁的弯曲延性性能和极限承载力, 探讨机制砂再生混凝土粗骨料取代率和机制砂含量对梁弯曲延性性能的影响。采用有限元对2组不同参数的机制砂再生混凝土梁进行数值模拟和分析。研究表明: 在机制砂含量相同的条件下, 梁极限承载力和弯曲延性系数均随粗骨料取代率增加而降低, 取代率为100%的机制砂再生混凝土梁延性相对机制砂混凝土梁延性减小了35%; 在粗骨料取代率相同的条件下, 机制砂含量对梁极限承载力和弯曲延性没有显著影响, 不同机制砂含量梁延性系数接近14, 机制砂可以很好地代替天然砂。本研究对理解机制砂再生混凝土梁的力学性能及其在工程中的应用提供了理论支撑。

## 关键词

弯曲延性; 模型试验; 机制砂再生混凝土梁; 粗骨料取代率; 机制砂含量;

## 1 引言

近年来, 城乡基础设施建设步伐加快, 建筑垃圾不断增加, 以传统方式处理建筑垃圾会带来诸多负面问题<sup>[1]</sup>, 如污染环境、浪费资源以及提高建筑成本等。将废弃混凝土重新利用, 再生混凝土成为了研究者们关注的焦点。目前对机制砂再生混凝土研究尚不完善, 需要进一步的研究与分析。本文主要通过有限元 Abaqus 进行数值模拟, 将模拟结

果与试验结果对比, 在验证了模型结果正确的基础上, 分别对不同机制砂含量和粗骨料取代率对梁弯曲延性的影响进行研究。

## 2 工程概况

丽江市玉龙县长水至拉市道路提升改造工程, 该项目位于城乡结合处, K0+000 到 K2+350 拆除混凝土路面, 改扩建为沥青路面, 项目部将拆除的混凝土进行加工为机制砂再次利用, 在 K4+000 到 K5+150 段用到 1700×250×150 钢筋混凝土梁 12000 根, 为使机制砂得到充分利用, 经过数次实验和分析得到相关数据, 将机制砂用在钢筋混凝土梁上, 降低了项目成本<sup>[2]</sup>。

【作者简介】冯建伟 (1982-), 男, 中国云南昆明人, 本科, 工程师, 从事公路交通工程研究。

### 3 试件设计

本文试件为单筋矩形截面，试件截面尺寸及配筋如图1所示。试验梁在底部受拉区配置2根直径为12 mm的HRB400级钢筋，箍筋和架立筋均采用直径为8 mm的HRB300级钢筋，混凝土保护层厚度为25 mm。

试验梁总长为1700 mm，梁底受拉钢筋长度为1650

mm，梁顶部架立筋分布在左、右两侧，长度为575 mm，同时梁左、右端各布置6个箍筋，间距为115 mm，在梁跨中形成500 mm的纯弯段。

为研究粗骨料取代率和机制砂含量对机制砂再生混凝土梁弯曲延性性能的影响，设计了2组共9片梁作为研究对象，如表1所示。

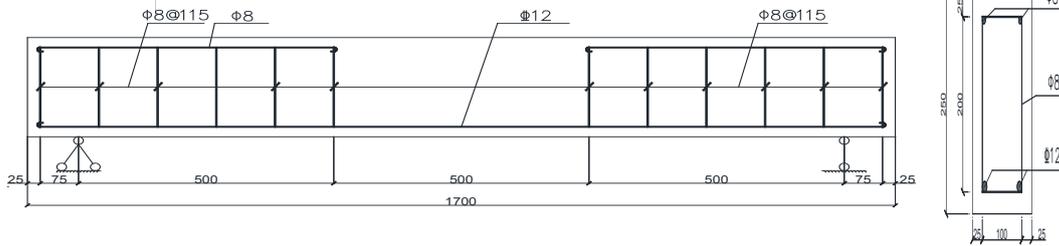


图1 试件尺寸及配筋图(单位: mm)

表1 试件参数表

编号	机制砂含量	粗骨料取代率
RC	100%	--
MC	--	100%
MRC-30	100%	30%
MRC-50	100%	50%
MRC-70	100%	70%
MRC-100	100%	100%
RMC-5	5%	100%
RMC-10	10%	100%
RMC-15	15%	100%

注: RC代表机制砂混凝土梁、MC代表普通再生混凝土梁、MRC和RMC分别代表不同粗骨料取代率和不同机制砂含量的机制砂再生混凝土梁。

### 4 有限元模拟验证

本文主要运用有限元计算软件Abaqus进行数值模拟，对模拟结果进行分析，最终完成不同粗骨料取代率与机制砂含量对机制砂再生混凝土梁的弯曲延性影响的研究<sup>[3]</sup>。

#### 4.1 材料本构关系

机制砂再生混凝土本构模型采用文献<sup>[15]</sup>研究成果，包括混凝土应力-应变本构关系如(1)所示:

$$\sigma = (1 - D_c)E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$D_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n-1+x^n} \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2+x} \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho_c = f_{cu}/E_c \varepsilon_{cu}, \quad n = E_c \varepsilon_{cu}/(E_c \varepsilon_{cu} - f_{cu}), \quad x = \varepsilon/\varepsilon_{cu}$$

式中:  $E_c$ 为弹性模量;  $D_c$ 为损伤演化参数;  $\sigma$ 为压缩应力;  $f_{cu}$ 为峰值应力;  $\varepsilon$ 为压缩应变;  $\varepsilon_{cu}$ 为峰值应变;  $\rho_c$ 、 $n$ 、 $\alpha_c$ 均为拟合中间系数，与混凝土的延性和脆性相关。

混凝土损伤通过损伤因子D表示，D的计算公式如(3)

所示:

$$D = 1 - E_D/E_0 \quad (3)$$

式中:  $E_D$ 为混凝土割线模量;  $E_0$ 为混凝土弹性模量。钢筋采用《混凝土结构设计规范》中双折线模型。

#### 4.2 边界条件及加载方式

试件采用普通简支梁的约束形式。本次模拟受拉区裂缝开展状况，在混凝土梁加载位置荷载以面荷载形式添加，两个荷载加载位置分别距离跨中250 mm处，为了增加计算的收敛性，采用显示强制位移形式加载。

#### 4.3 模拟结果验证的分析

主要在梁破坏模式和跨中荷载-挠度曲线两个方面将模拟结果和试验结果进行对比分析。



图2 混凝土损伤对比图

图2为混凝土梁试验和模拟下的损伤对比图。由图可知，混凝土梁跨中纯弯段均为竖向裂缝，靠近支点位置处出现斜裂缝，混凝土损伤模拟结果和试验结果吻合度较高。

普通再生混凝土梁跨中荷载-挠度曲线试验值和模拟值对比如图3。加载初期试验梁全截面受力，钢筋和混凝土一起工作，荷载-挠度变形曲线呈线性关系；随着荷载的增加，混凝土梁下缘出现竖向裂缝，受压区混凝土退出工作，钢筋受拉，曲线斜率发生变化，在这个阶段，随着荷载不断增加，裂缝不断扩展；当受拉区钢筋达到屈服时，荷载不再变化，挠度不断增加。因为再生混凝土实际弹性模量和强度高于模拟值，所以线性阶段刚度和极限荷载试验值略大于模拟值，二者可以很好地吻合。

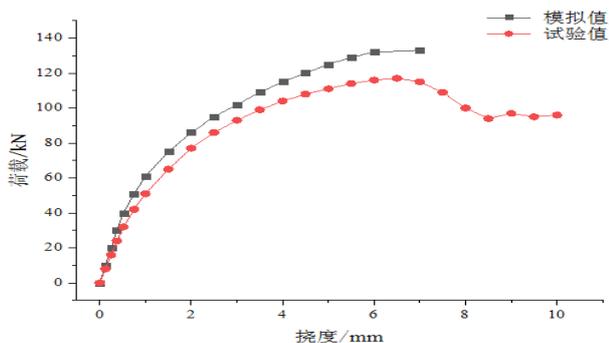


图3 RC梁荷载-挠度曲线对比图

## 5 弯曲延性分析

延性是指构件在达到极限承载力后持续变形的能力，可以降低构件的脆性破坏，对结构安全具有重要的意义，本文主要考虑机制砂再生混凝土粗骨料取代率和机制砂含量对机制砂再生混凝土梁延性的影响，延性评定指标采用文献<sup>[11]</sup>中给出的延性系数。

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (4)$$

式中： $\Delta_u$ 为荷载-挠度曲线下降到85%的极限荷载时的挠度值； $\Delta_y$ 为梁屈服时对应的挠度值。

### 5.1 荷载-挠度曲线

不同粗骨料取代率试件荷载-挠度曲线如图4所示。随着粗骨料取代率的增加，梁极限承载力逐渐减小，且减小的趋势逐渐减小。这是因为粗骨料作为混凝土的骨架，对混凝土强度起关键作用，粗骨料的取代率对混凝土强度影响较大，取代率越大，混凝土强度越低，梁极限承载力就越小。由荷载-挠度曲线可知：在线弹性阶段，随着取代率的增加，曲线斜率逐渐减小，这主要是因为取代率的增加导致混凝土弹性模量的减小，梁的刚度下降。

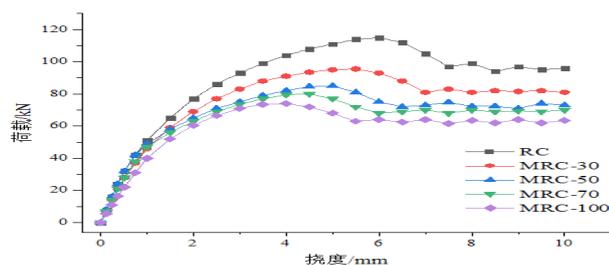


图4 粗骨料取代率对荷载-挠度曲线影响

图5为不同机制砂含量试件荷载-挠度曲线图。由图可知：随着机制砂增加，梁的极限承载力先增加后减小，含量为10%时极限承载力最高。这是由于随着机制砂含量的增加，混凝土强度先增加后减小，但机制砂含量的再生混凝土强度变化影响很小。

### 5.2 延性参数分析

图6为粗骨料取代率和机制砂含量对试件延性系数影响的变化曲线图。如图所示，随着粗骨料取代率的增加，机

制砂再生混凝土梁延性减小，取代率100%机制砂再生混凝土梁延性相对机制砂混凝土梁延性减小了35%；随机制砂含量的增加，机制砂再生混凝土梁延性系数在14的位置上下波动，机制砂含量为10%时，梁的延性系数最大，此时的延性最好，因此机制砂含量对机制砂再生混凝土梁的延性没有显著影响，机制砂可以较好地取代天然砂。

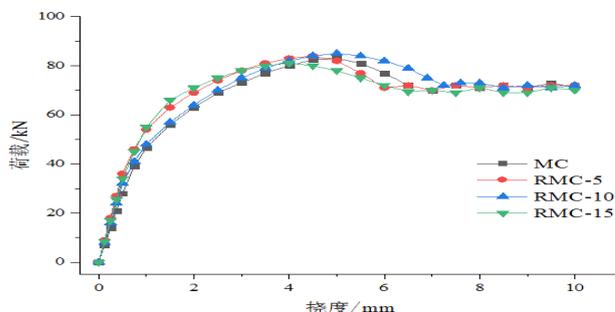


图5 机制砂含量对荷载-挠度曲线的影响

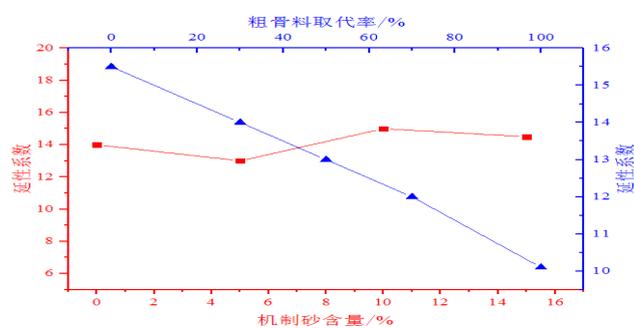


图6 不同参数对延性系数的影响

## 6 结论

通过将有限元Abaqus计算结果与试验结果对比，在验证计算结果的正确的前提下，运用Abaqus完成粗骨料取代率和机制砂含量对机制砂再生混凝土梁延性影响的研究，主要结论如下：

- (1) 通过机制砂混凝土试验梁破坏模式和荷载-挠度曲线与有限元对比，得出Abaqus模型计算结果正确；
- (2) 粗骨料取代率对梁的极限承载力刚度影响较大，随着取代率的增加，梁的极限承载力和刚度均减小，而机制砂含量对梁的极限承载力和刚度没有显著影响；
- (3) 粗骨料取代率对机制砂再生混凝土梁延性有较大影响，取代率100%机制砂再生混凝土梁延性相对机制砂混凝土梁延性减小了35%，取代率越高，延性越小。机制砂含量对梁延性没有显著影响。

### 参考文献

- [1] 王琼, 於林锋, 方倩倩, 等. 国内外建筑垃圾综合利用现状和国内发展建议[J]. 粉煤灰, 2014(04): 19-21.
- [2] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1554-1558.
- [3] 李旭平, 赵滇生. 再生混凝土的早期抗压强度与弹性模量研究[J]. 施工技术, 2008(06): 63-66.