

再生骨料混凝土梁的有限元分析

张守卫¹, 陈士琳¹, 熊玮¹, 陈同同¹, 张明鑫²

1. 合肥滨湖职业技术学院, 安徽 合肥 230601

2. 中建六局第八建设有限公司, 安徽 合肥 230601

DOI: 10.61369/SSSD.2026050034

摘 要 : 为了解不同再生骨料取代率下, 再生混凝土梁的各种性能, 建立其有限元模型。模型各项参数由实际实验和公式计算所得, 后对再生混凝土梁的支座反力, 塑性应力进行分析, 得到极限荷载、开裂荷载和荷载-位移曲线。其分析结果表明: 随着再生骨料的而加入, 梁的极限荷载降低, 位移减少, 抗拉能力下降, 梁更容易发生脆性破坏。当取代率从40%到50%时, 梁的极限荷载下降幅度增大。相比较而言, 掺量为30%时与普通混凝土梁差距不大, 所以再生骨料取代率为30%的混凝土梁性价比最高。

关 键 词 : 再生骨料; 荷载-位移曲线; 取代率; 有限元分析

Finite Element Analysis of Recycled Aggregate Concrete Beams

Zhang Shouwei¹, Chen Shilin¹, Xiong Wei¹, Chen Tongtong¹, Zhang Mingxin²

1. Hefei Binhu Vocational and Technical College, Hefei, Anhui 230601

2. The Eighth Construction Co., Ltd. of China State Construction Sixth Engineering Division, Hefei, Anhui 230601

Abstract : In order to understand the various properties of recycled concrete beams with different replacement rates of recycled aggregate, the finite element model was established. The parameters of the model are calculated by practical experiments and formulas, and then the bearing reaction and plastic stress of recycled concrete beams are analyzed, and the ultimate load, cracking load and load-displacement curves are obtained. The analysis results show that: With the addition of recycled aggregate, the ultimate load, displacement and tensile capacity of the beam decrease, and the beam is more prone to brittle failure. When the replacement rate is from 40% to 50%, the ultimate load of the beam decreases greatly. Comparatively speaking, when the content is 30%, there is not much difference with ordinary concrete beams, so the concrete beam with 30% replacement rate of recycled aggregate has the highest cost performance.

Keywords : recycled aggregate; load-displacement curve; substitution rate; finite element analysis

随着经济飞速发展, 全国新建居民楼日益增多, 导致建筑垃圾无法处理, 其中废弃粘土砖为最。将废弃粘土砖破碎后代替天然骨料制备成再生混凝土, 一方面减少天然骨料的使用, 另一方面可以消耗建筑垃圾。

然而再生混凝土由于骨料的取代率不同会产生不同的工作性能和力学性能, 会对混凝土的孔隙率、吸水率、抗压强度和耐久性产生影响, 其中混凝土的本构关系尤为重要。在国外, 最早由 Bairagi^[1] 提出: 不同掺量的再生混凝土本构关系曲线趋势相近, 后由 Topcu^[2] 得出不同掺量再生粗骨料下的应力-应变曲线。Huda and Alam^[3] 研究了再生骨料混凝土的弹性模量、泊松比与普通混凝土的曲别。而到近年, Peng.J.L^[4]、Sabău^[5] 等国内外学者还在对再生混凝土本构关系进行深入研究。

当再生混凝土应用到混凝土梁中, 与钢筋的结合作用是否满足建筑要求, 不同取代率对混凝土梁有何影响, 在不影响性能的情况下, 最佳取代率是多少, 都是需要考虑的问题。基于这些问题, 建立相关的有限元模型, 对再生混凝土梁的支座反力, 位移表现, 塑性应力等进行分析, 得出相较合理的取代率, 为再生混凝土梁构件后续的研究提供了一定的理论基础。

一、材料的本构关系

弹性, 非线性弹性, 弹塑性及其他力学理论等四类。不同的本构关系, 对于钢筋混凝土模型的影响很大。

(一) 再生混凝土的本构

混凝土在单轴受压和受拉时的应力-应变关系称之为混凝土的本构关系。在有限元模拟中, 混凝土的本构关系可以分为线弹性, 非线性弹性, 弹塑性及其他力学理论等四类。不同的本构关系, 对于钢筋混凝土模型的影响很大。

对于再生混凝土的本构关系, 国内外学者有许多相关的推导公式, 出于计算考虑采用 Du, T^[6]、Xiao.J.Z^[9] 等提出的应力-应变关系式, 其曲线与普通的混凝土在形状上是相似的, 具体关

作者简介: 张守卫 (1998—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向为工程结构安全理论和应用。

通信作者: 陈士琳, 女, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事工程造价相关。

系为

$$y = \begin{cases} a + (3-2a)x^2 + (a-2)x^3, 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{b(x-1)^2 + x}, x \geq 1 \end{cases}$$

其中参数 a 和 b 取决于再生骨料取代率

而在 ansys 软件中, 传统的本构模型定义方式通常有 MISO (多线型等向强化模型) 和 MKIN (多线型随动强化模型) 二种, 定义的是塑性本构关系, 然后结合 SOLID65 单元的 W-W 五参数屈服准则和最大拉应力准则, 根据不同的拉压应力分区域分别采用, 这样能够较好的反应从高到低静水压力下的破坏特性, 但是如果应力超出了破坏曲面, 应力会立即降为零, 从而无法考虑材料在达到塑性之后的软化影响。

所以本文采用 WB 中的屈服模型和软化模型共同定义混凝土本构。其中屈服准则采用 DPC 或者 MWC 来定义, 软化阶段的本构曲线采用 HSD2 或者 HSD6, HSD2 是由幂函数与指数函数构成的本构曲线, HSD6 是由线性本构构成

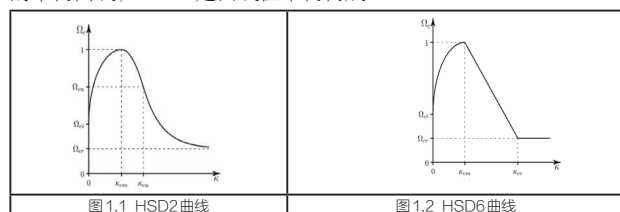


图 1.1 HSD2 曲线

图 1.2 HSD6 曲线

(二) 钢筋本构

在力学性能方面钢筋与混凝土存在比较大的差异, 钢筋材料的本构关系一般采用线弹性本构和理想线弹性本构。为了方便模型的收敛和计算, 故采用理想线弹性本构, 其应力 - 应变如下图

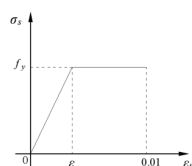


图 1.3 钢筋本构曲线

(三) 钢筋滑移粘接本构

通过阅读文献发现, 再生混凝土与钢筋之间的粘结 - 滑移曲线与普通混凝土相比并没有质的变化。粘结 - 滑移曲线也分为上升段与下降段, 其中上升段采用 Haraji^[7] 提出的公式, 下降段采用如下公式。

$$\begin{cases} \tau = \left(\frac{s}{s_u} \right)^{0.3} \tau^u \text{ 上升段} \\ \tau = \frac{\frac{s}{s_u}}{b \left(\frac{s}{s_u} - 1 \right)^2 + \frac{s}{s_u}} \tau^u \text{ 下降段} \end{cases}$$

其中对于参数 b, 用 HPB235 时取 0.038, 用 HRB335 时, 取决于再生骨料掺量, 0 和 50% 时取 0.1, 100% 时取 0.15。

在有限元分析中用弹簧单元模拟钢筋与混凝土的滑移。由《混凝土结构设计规范》^[10] 得出钢筋切向力的计算公式为 $F = 3.14L \cdot D \cdot t$, 其中 D 为钢筋直径, L 为单元的长度, t 为对应

得切向应力, 从而计算出弹簧单元得 F-D 曲线, 由 F-D 曲线模拟钢筋混凝土之间得粘结 - 滑移曲线,

二、参数设计

(一) 再生混凝土及钢筋参数

1. 各向同性弹性参数

在 WB 中, 各向同性弹性参数主要分为: 混凝土弹性模量、泊松比、体积模量、剪切模量。

其中弹性模量反应的是材料抵抗弹性变形能力大小的数据, 受材料分子之间键合强度影响, 泊松比反应的是混凝土横向变形。对于再生混凝土来说, 弹性模量可以取应力 - 应变曲线二点之间的割线模量计算值, 弹性模量、峰值应变等相关公式如下。

$$E_c = 5.5 \times 10^3 \cdot \sqrt{f_c^r} \cdot \left(1 - \frac{r}{2.2876r + 0.1288} \right)$$

$$\varepsilon_0^r = \left\{ 0.00076 + \left[(0.626f_c^r - 4.33) \times 10^{-7} \right]^{0.5} \right\} \cdot \left(1 - \frac{r}{B(r)} \right)$$

r 为混凝土中骨料的取代率

最终参数确定如下表

表 2.1 各向同性参数

编号	取代率	f_c^r	弹性模量 / E_c	泊松比 / ν_t	体积模量	剪切模量
NC	0	34.71	3.241	0.210	1.862	1.339
RC1	30%	32.77	1.775	0.201	0.989	0.738
RC2	40%	30.43	1.710	0.198	0.943	0.713
RC3	50%	25.91	1.577	0.195	0.861	0.659
HPB300	/	/	21	0.3	17.5	8.07
HRB400	/	/	21	0.3	17.5	8.07

注: 体积模量、剪切模量由 WB 根据弹性模量和泊松比计算得出

2. 软化模型参数

WB 中, 软化曲线有二种定义方式: HSD2、HSD6, 为使模型收敛及方便计算, 使用 HSD6 曲线。HSD6 软化模型主要有六种参数: ① K_{cm} : 再生混凝土应力 - 应变曲线峰值点的塑性应变, 取 ε_0^r 的计算值; ② K_{cr} : 混凝土抗压塑性应变的最大值, 一般取 0.01; ③ O_{ci} : 混凝土开始硬化时的相对应力, 即应力 - 应变曲线起点的相对位置, 由再生混凝土的应力 - 应变曲线得出; ④ O_{cr} : 残余相对应力, 混凝土应力 - 应变曲线趋于平行时应变的相对值; ⑤ K_{tr} : 混凝土抗拉塑性应变的极值; ⑥ O_{tr} : 抗拉残余塑性应变;

各参数取值如下表

表 2.2 软化曲线参数

参数	NC	RC1	RC2	RC3
K_{cm}	0.002079	0.002031	0.001972	0.001849
K_{cr}	0.01	0.01	0.01	0.01
O_{ci}	0.3	0.3	0.3	0.3
O_{cr}	0.15	0.15	0.15	0.15
K_{tr}	0.01	0.01	0.01	0.01

O_{cr}	0.1	0.1	0.13	0.16
----------	-----	-----	------	------

注：以上参数，除 K_{sc} 外，皆由混凝土本构曲线，及软件计算要求得出

(二) 弹簧单元参数

在 WB 中，弹簧单元是用 F-D 曲线来定义的，以 F-D 曲线来模拟钢筋混凝土之间的粘结 - 位移曲线，其参数值按下表计算

表 2.3 粘结 - 滑移曲线参考值

特征点	劈裂 (cr)	峰值 (u)	残余 (r)
粘结应力 (N/mm ²)	τ_{cr}	$2.5f_{t,r}$	τ_u
相对滑移 (mm)	S_{cr}	S_u	S_r

以普通混凝土抗拉强度 2.2N/mm²、钢筋直径 20mm 为例，三种应力分别为 5.5 N/mm²、6.6 N/mm²、2.2 N/mm²，对应的相对滑移为 0.4mm、0.64mm、8.8mm。且相对滑移的最大值为设置的单元格长度，已知弹簧切向力的计算公式为 $F = 3.14L \cdot D \cdot t$ ，以此得到弹簧单元的 F-D 曲线

表 2.4 F-D 曲线取值

D	0	0.4	0.64	8.8	20
F	0	6908	8289.2	2763.2	2763.2

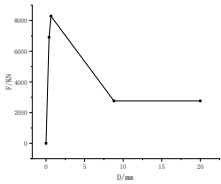


图 2.1 粘结 - 滑移本构曲线

三、模型的建立

本文有限元模型主要使用 WB 中的 SC 模块进行建模，混凝土梁模型尺寸为 2000×300×150mm。纵向的受力钢筋为直径 16mm 的 HRB400 钢筋，箍筋和架立筋用的是直径为 8mm 的 HPB300 钢筋。采用分离式建模，把混凝土单元与钢筋单元分开建立，二者之间通过接触单元和节点的耦合来相互作用。同时，对于计算钢筋与混凝土之间的滑动，必须使用分离式建模，在二者之间的接触节点添加弹簧单元以模拟滑动情况。

(一) 混凝土单元及网格划分

对于加压的混凝土梁模型，比较容易在支座和加载位移的位置出现应力集中所以在支座位置和加载处设置了刚性垫片，尺寸为 150×50×10mm。支座采用半径为 25mm 的半圆柱。在网格划分方面，混凝土本体的网格尺寸取混凝土梁保护层厚度 25mm，支座垫板和加载垫板高度只有 10mm，不够一个单元格长度，考虑其不影响计算结果，故在竖直方向简单分三层划分网格，划分网格如下图

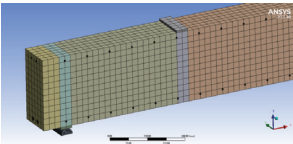


图 3.1 模型网格划分

(二) 钢筋及弹簧单元的建立

对于钢筋，采用 LINK180 实体杆单元进行建立，有三个方向的自由度。上部钢筋设置其直径为 8mm，下部钢筋直径 16mm，箍筋间距为 50mm，划分网格的单元长度与混凝土相同为 25mm，采用经典 ANSYS 中的命令流实现，为防止混凝土节点与钢筋节点对应不上，弹簧单元的长度也为 25mm，钢筋节点与混凝土节点一一对应，如下图所示

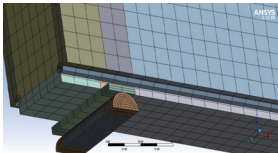


图 3.2 网格节点详图

四、有限元结果分析

(一) 极限荷载

软件得后处理部分，在位移加载处添加支反力来反映模型得荷载情况，在模型能破坏得最大位移处的支反力，即为模型的极限荷载。

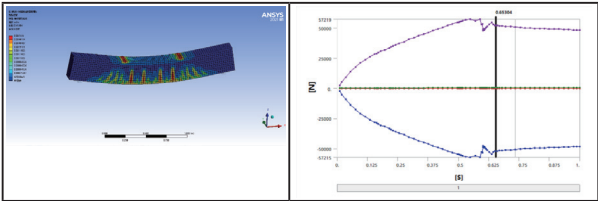


图 4.1 NC 组塑性应变及支反力

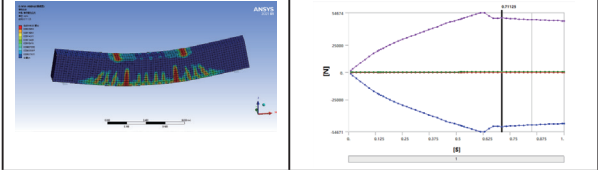


图 4.2 RC1 组塑性应变及支反力

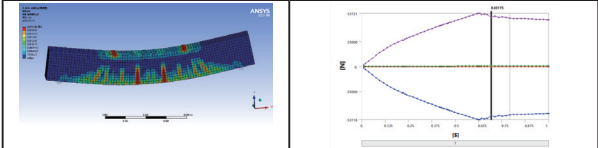


图 4.3 RC2 组塑性应变及支反力

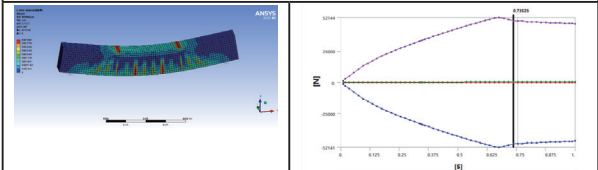


图 4.4 RC3 组塑性应变及支反力

表 4.1 极限荷载

编号	步数	时间	最大位移	极限荷载
NC	57	0.65s	1.01mm	217.81KN
RC1	41	0.71s	0.82mm	199.51KN
RC2	44	0.69s	0.79mm	189.29KN
RC3	43	0.73s	0.76mm	172.15KN

从应力云图可以看出 NC 模型在跨中底部出现四条条巨大裂缝而破坏，破坏时裂缝于跨中部位分布较为均匀，在支座与加载点之

间出现了剪切破坏。而 RC1、RC2、RC3 破坏时的裂缝逐渐向跨中位置集中，二端的剪切破坏较 NC 组更加明显。

由上表可知，掺量为 30% 时，再生混凝土梁的极限荷载最大，之后随着掺量从 40% 到 50% 增加，极限荷载下降更快。四组相比，RC1 的极限荷载下降不大，破坏时的裂缝分布、塑性应力比较均匀，且塑性能力下降不大。

（二）开裂荷载

混凝土梁在开裂时受拉边缘混凝土的极限应变与峰值应变是计算开裂荷载的主要依据。当模型梁的底部出现塑性应变时，混凝土部分达到受拉极限应变，可以认为荷载达到了开裂荷载，继续加载梁会出现裂缝。其塑性应力云图如下

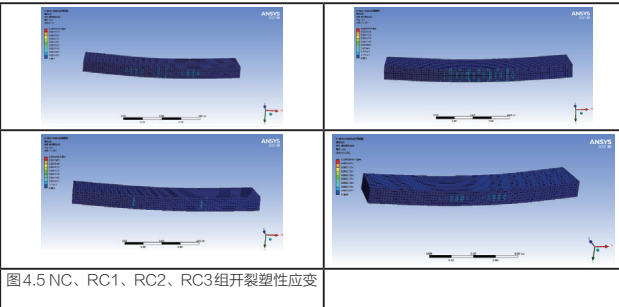
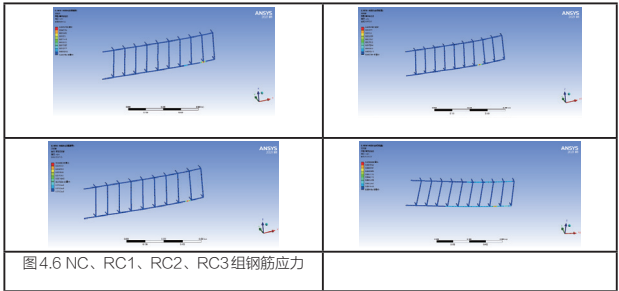


表 4.2 开裂荷载

编号	步数	时间	最大位移	极限荷载
NC	10	0.115s	0.177mm	93.96KN
RC19		0.095s	0.145mm	58.45KN
RC2	9	0.095s	0.145mm	56.51KN
RC3	9	0.095s	0.145mm	52.52KN

由应力云图和数据可以看出 NC 和 RC1 组裂缝出现的条数比较多，而另外二组的裂缝由位移加载处出现，只有二条。说明 NC、RC1 组的混凝土与钢筋的适配性更好，裂缝开展更加合理。就强度来说，RC1 较 NC 组开裂荷载只有 58.45KN，下降了 37%，下降幅度比较大。之后随着掺量的增加开裂荷载进一步下降。就混凝土开裂后钢筋的应力，如下图



由混凝土开裂后的钢筋应力可以看出，NC、RC1、RC2 组模型在混凝土开裂到梁破坏过程中，架立钢筋受压，底部纵筋受拉，钢筋受拉应力在梁的跨中区域最大。而 RC3 组模型底部钢筋出现大面积的受拉应力，可能是因为混凝土刚度下降，钢筋在混凝土底部破坏后承受更大的拉应力。

（三）荷载 - 位移曲线

通过软件后处理，可以得到模型总变形与时间的关系，同时，模型的支反力与时间之间也有一定联系，且二者之间的时间，一一对应，将二者数据方在一起进行对比可以得到模型的荷

载 - 位移曲线，四组模型的荷载 - 位移曲线如下

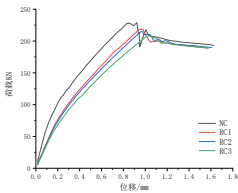


图 4.7 荷载 - 位移曲线

由图可以看出，再生混凝土的各组模型在荷载初期，荷载和位移变化的趋势基本重合，都是呈线性增长，较之普通混凝土，增长速度更慢。在荷载到达一定程度后，曲线出现了明显的下降段。各组模型在达到屈服阶段时都有非常明显的拐点，掺量为 30% 和 40% 的模型拐点位置相近，与普通混凝土差距不大，而 50% 掺量的再生混凝土梁拐点位置明显向后移动，在达到最大荷载时位移更大，说明其构件抵抗变形的能力下降。相比零掺量的 NC 组，RC1 的荷载 - 位移曲线更加平滑，在加载初期变形更小，且极限承载力相差不大。

五、结论

（1）30% 掺量的试件，相较于零掺量极限承载力差别不大。随后，随着掺量的增加，极限承载力下降更快。达到 50% 掺量后，极限承载力下降 21%。

（2）在添加了再生骨料后，模型的抵抗变形能力有所下降，即塑性能力下降。随着掺量的增加相同荷载下的变形越来越大。试件更加容易发生变形，导致结构可能不稳定破坏。

（3）总结四种模型的分析结果，再生骨料取代率为 30% 时最合适，其性能相较普通混凝土变化不大。而 50% 掺量之后继续提高掺量会导致整体性能下降明显，可以预测比 50% 掺量更高的再生混凝土不适用于梁构件中。

参考文献

[1] Bairagi N K, Kishore R. Behavior of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates, Resource [J] . Conservation and Recycling,1993,9 (3) : 109.

[2] i' lker Bekir Topçu and Nedim Firat Gü nç an. Using waste concrete as aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7) : 1385-1390.

[3] Sumaiya B. Huda and M. Shahria Alam. Mechanical and Freeze-Thaw Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10) : 04015003-04015003.

[4] Ji-Liang Peng et al. Stress - Strain Relationship Model of Recycled Concrete Based on Strength and Replacement Rate of Recycled Coarse Aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9) : 04019189-04019189.

[5] Marian Sabău and Jes ú s Remolina Duran. Prediction of Compressive Strength of General-Use Concrete Mixes with Recycled Concrete Aggregate[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2021, : 1-13.

[6] Du, T., Wang, W., Liu, Z. et al. The complete stress-strain curve of recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading. J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit. 25, 862 - 865 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11595-010-0109-9>

[7] Haraji M H .Developmen t/ splice strength of reinf orcing bars embedded in pail and fiber reinforced concret e[J] .ACI Structu ral Journal, 1994, 91(5) :511.