

基于 ANSYS 的再生砖粗骨料混凝土梁 受弯性能有限元分析

赵爱华, 翟爱良, 戚勇帼, 王成名, 韩健

(山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 为深入了解再生砖粗骨料混凝土梁的受弯性能,通过 ANSYS 有限元分析软件,对不同再生砖粗骨料替代率和不同纵向受拉钢筋配筋率的混凝土梁受弯性能进行了模拟分析。结果表明:混凝土梁的有限元计算结果与试验结果吻合较好,有限元数值分析可以有效的模拟再生砖粗骨料混凝土梁的受弯性能;再生砖粗骨料替代率和纵向受拉钢筋配筋率对混凝土梁的极限弯矩与跨中极限挠度影响显著,再生砖粗骨料影响系数 k 在配筋率为 1.01 ~ 1.48% 范围内时稳定较好。

关键词: 再生砖粗骨料; 混凝土梁; ANSYS; 受弯性能; 再生砖粗骨料替代率; 纵向受拉钢筋配筋率; 极限弯矩

中图分类号: TV332、12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0200-07

Finite element analysis of concrete beam's flexural property of recycled brick coarse aggregate based on ANSYS

ZHAO Aihua, ZHAI Ailiang, QI Yongguo, WANG Chengming, HAN Jian

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: In order to understand the flexural properties of recycled brick coarse aggregate concrete beams deeply, based on ANSYS finite element analysis software, the paper simulated and analyzed the flexural property of recycled brick coarse aggregate concrete beams with different replacement ratios of recycled brick aggregate and different longitudinal tensile reinforcement ratio. The results show that the calculation results of finite element fit perfectly with that of test. The numerical analysis of finite element can simulate the flexural property of recycled brick coarse aggregate concrete beams effectively; the replacement ratio of recycled brick coarse aggregate and longitudinal tensile reinforcement ratio have a great influence on ultimate bending moment and ultimate deflection of mid-span; the recycled brick aggregate influence coefficient k is stable when the reinforcement ratio is in the range of 1.01% to 1.48%.

Key words: recycled brick coarse aggregate; concrete beam; ANSYS; flexural property; replacement ratio of recycled brick coarse aggregate; reinforcement ratio of longitudinal tensile; ultimate bending moment

将建筑垃圾中的碎砖废弃物资源化再生利用,做成骨料用以配制中低强度的混凝土,在经济、环保和科学研究等方面都极具重要意义。近年来,国内外已有研究人员对再生砖粗骨料混凝土性能与应用进行了研究和开发,但是,大多数科研项目侧重于再生砖粗骨料混凝土物理性能与基本力学性能的研究^[1-7],仅山东农业大学的季昌良和王纯合对再生砖粗骨料混凝土梁正截面受弯性能与斜截面受剪性能进行了研究分析^[8-10],且均局限于试验分析,对

其非线性有限元分析的研究尚处于空白阶段。

本文基于山东农业大学所进行的再生砖粗骨料混凝土梁受弯性能试验^[8],补测了再生砖粗骨料混凝土劈裂抗拉强度、应力-应变关系曲线以及静力受压弹性模量等基本力学性能指标,通过 ANSYS 有限元分析软件对试验梁进行了数值模拟,并拓展分析了不同再生砖粗骨料替代率和不同纵向受拉钢筋配筋率对混凝土梁受弯性能的影响规律,为再生砖粗骨料混凝土的进一步研究与推广应用奠定基础。

收稿日期:2014-03-01; 修回日期:2014-03-29

作者简介:赵爱华(1989-),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向:工程结构鉴定与加固改造。

通讯作者:翟爱良(1963-),男,山东成武人,教授,主要从事结构工程鉴定与加固改造研究。

1 试验概况

为了研究再生砖粗骨料混凝土梁的受弯性能,山东农业大学季昌良进行了5根不同再生砖粗骨料替代率的混凝土梁受弯性能试验^[8]。梁编号 LF1~LF5,5根试验梁截面尺寸、剪跨比、配筋均相同,如

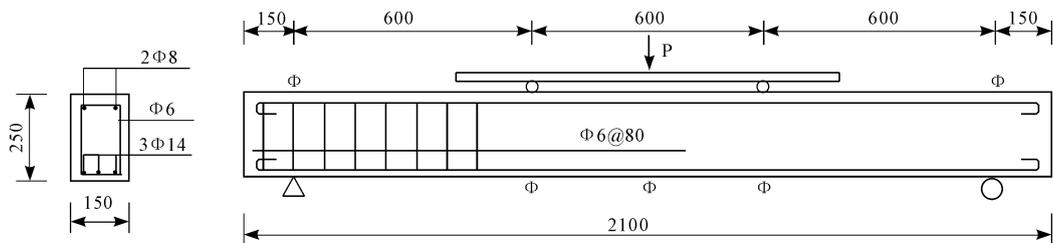


图1 试验加载装置及梁的尺寸与配筋

表1 试件参数

编号	再生砖粗骨料 替代率	截面特征 $b \times h \times l$	截面特征			保护层
			下部钢筋	上部钢筋	箍筋	厚度
LF1	0	150 × 250 × 2100	3Φ14	2Φ8	Φ6@80	35
LF2	30	150 × 250 × 2100	3Φ14	2Φ8	Φ6@80	35
LF3	50	150 × 250 × 2100	3Φ14	2Φ8	Φ6@80	35
LF4	70	150 × 250 × 2100	3Φ14	2Φ8	Φ6@80	35
LF5	100	150 × 250 × 2100	3Φ14	2Φ8	Φ6@80	35

2 非线性有限元分析

通过 ANSYS 有限元分析软件进行再生砖粗骨料混凝土梁受弯性能的非线性分析。为较好地分析混凝土梁的力学性能及混凝土和钢筋两种不同材料相互作用的微观机理,本文采用分离式模型进行建模,混凝土裂缝采用弥散裂缝模型^[11]。

2.1 单元选取

2.1.1 再生砖粗骨料混凝土单元 再生砖粗骨料混凝土选用 Solid65 单元模拟。Solid65 单元是 ANSYS 中可以有效分析混凝土的八节点六面体单元,该单元是在 Solid45 单元的基础上,加入混凝土的三维强度准则,既可以跟踪混凝土的弹性、塑性变形以及蠕变,又能综合考虑混凝土的开裂和压碎等多种非线性材料特性,且能够通过定义3个方向的配筋率考虑3个方向的钢筋^[12]。

2.1.2 钢筋单元 纵筋、箍筋和架立筋均采用 Link8 单元模拟。Link8 单元是具有两节点的三维杆单元模型,每个节点上具有 X, Y, Z 位移方向的3个自由度,能承受单向拉伸或压缩,包括有塑性,潜变,膨胀,应力强化及大变形等特性,但无法承受力矩^[13]。

图1所示。截面尺寸为 150 mm × 250 mm × 2100 mm,剪跨比为 2.79,受拉筋选用 3Φ14 (HRB335),配筋率为 1.23%,架立筋为 2Φ8,箍筋沿梁全长配 Φ6@80,配箍率为 0.47%,试验采用分配梁实现两点加载,试件类型如表1所示。

2.2 钢筋混凝土结构的本构关系

2.2.1 再生砖粗骨料混凝土的本构关系 本文采用的破坏准则为 William - Warnke 5 参数模型,它由混凝土的单轴抗压强度、单轴抗拉强度、二轴等压强度、在拉子午线上的三轴强度以及在压子午线上的三轴强度这5个参数确定混凝土的三维强度包络图。由于试验无静水压力,所以只输入再生砖粗骨料混凝土的单轴抗压强度与抗拉强度即可。且为有效帮助计算收敛,关闭压碎开关,设定单轴抗压强度为 -1,即采用带有“拉力截断”的 Von Misses 模型,在水压不大的情况下可以取得较好的结果。

再生砖粗骨料混凝土的本构关系采用多线性等向强化模型 MISO 模拟,以确定屈服准则、流动法则及硬化法则。为反映再生砖粗骨料混凝土的材料特性,本次有限元模拟过程中用到的各混凝土梁的材料参数和本构关系均由试验测得。本研究根据上述试验梁所采用的配合比^[8]制作了30块棱柱体试块和30块立方体试块,严格参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081 - 2002)的试验步骤、相关规定及试验结果数据分析计算公式,进行劈裂抗拉强度、棱柱体抗压强度、单轴应力 - 应变曲线和静力受压弹性模量的测定。再生砖粗骨料混凝土

单轴应力-应变关系曲线见图2,各构件混凝土材料参数见表2。考虑到试验仪器对应力-应变关系曲线下降段数据检测精度的降低,以及有限元分析中下降段对试验结果影响很小等因素^[14],本研究所采用的再生砖粗骨料混凝土单轴应力-应变关系曲线的下降段取最大应力值的85%左右的实测数据为最终数据点。为了保证数值模拟的准确性,及有助于计算的收敛,文献[15]建议混凝土开裂后张开裂缝的剪力传递系数取0.4~0.7,闭合裂缝的剪力传递系数取0.9~1,本研究中以上两个系数分别取0.5和0.95。

2.2.2 钢筋本构关系 钢筋单元的本构关系选用

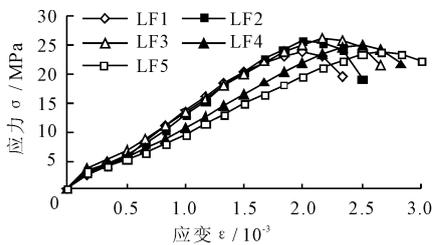


图2 再生砖粗骨料混凝土单轴应力-应变关系曲线

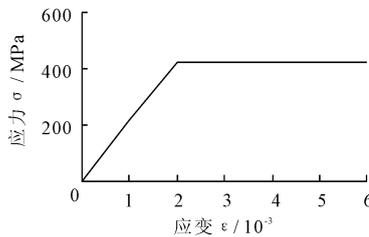


图3 受拉区钢筋本构关系

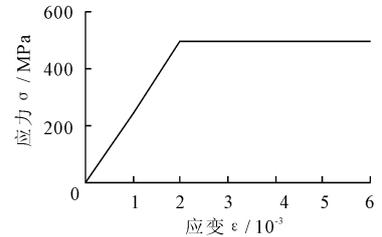


图4 箍筋、受压区钢筋本构关系

表3 钢筋材料参数 MPa, GPa

钢筋类别	屈服强度	弹性模量	泊松比 ν_c
HPB235; $\Phi 8, \Phi 6$	492	210	0.3
HRB335; $\Phi 14$	427	200	0.3

2.3 有限元模型建立与加载求解

考虑到模型受力和结构的对称性,采用1/4模型建模以节约计算量。创建分离式模型时,将几何实体在钢筋位置切分,划分网格时将钢筋位置的实体边线定义为钢筋即可。假定钢筋和混凝土之间黏结良好,共同节点处位移协调,不考虑两者之间的滑移。荷载通过施加局部面荷载模拟加载力加载,梁端简支支撑,支座处采用Y方向的线约束,在对称面上施加对称约束。同时采用力收敛准则和位移收敛准则,收敛容差均为5%,每个荷载子步的迭代次数为40。钢筋和混凝土的有限元计算模型见图5、6。

2.4 计算值与试验值对比分析

此处除开裂弯矩、极限弯矩的对比分析中给出了5根试验梁的有限元计算结果外,其他对比分析部分均以试验梁LF2为例,代表性地详述有限元模拟情况。

2.4.1 开裂弯矩、极限弯矩的对比分析 经过数值分析计算,试验梁LF1~LF5的计算开裂弯矩、极限弯矩和试验值的对比及相对误差见表4。由表可

理想弹塑性模型,采用双线性等向强化模型BISO模拟,有限元分析中所用的钢筋材料参数均为试验实测值^[8],应力-应变关系曲线见图3、4,材料参数见表3。

表2 再生砖粗骨料混凝土材料参数 $\%$, MPa, 10^4 N/mm^2

试验梁编号	再生砖粗骨料替代率	棱柱体抗压强度 f_c	劈裂抗拉强度 f_t	静力抗压弹性模量 E_c	泊松比 ν_c
LF1	0	22.6	1.98	2.85533	0.2
LF2	30	24.5	2.07	2.29620	0.2
LF3	50	24.9	2.10	2.08776	0.2
LF4	70	23.9	2.01	1.58141	0.2
LF5	100	22.8	1.95	1.33716	0.2

知,对于开裂弯矩与极限弯矩,有限元计算值略小于试验实测值,但总体上相差不大,相对误差均在10%以内,说明有限元数值分析能较好地计算再生砖粗骨料混凝土梁的极限承载力,且偏于安全。对于开裂弯矩计算偏小,分析认为一方面与ANSYS有限元分析时采用的混凝土本构关系有关,分析时近似的令受拉弹性模量等于受压弹性模量^[16],与实际情况有所不符;另一方面,试验过程中裂缝首先出现在梁体内部,无法及时观测,造成了试验梁开裂弯矩实测值偏高。对于极限弯矩计算值偏小,分析认为主要原因是有限元分析过程中未考虑混凝土的压碎,以保证较好的收敛,但对于极限承载力计算的准确性有一定的影响。

表4 开裂弯矩、极限弯矩试验值与计算值对比

试验梁编号	kN·m, %					
	M'_{cr}	M^c_{cr}	相对误差	M'_u	M^c_u	相对误差
LF1	4.86	4.72	2.88	45.1	44.12	2.16
LF2	4.77	4.71	1.26	42.5	41.50	2.35
LF3	4.71	4.54	3.61	47.0	44.52	5.36
LF4	4.68	4.66	0.43	47.9	45.34	5.43
LF5	4.71	4.75	-0.85	48.7	45.66	6.27

注: M'_{cr} 为实测开裂弯矩; M^c_{cr} 为计算开裂弯矩; M'_u 为实测极限弯矩; M^c_u 计算极限弯矩。

2.4.2 裂缝分布与应力状态的对比分析 图7显示了数值模拟极限荷载时的裂缝分布情况。对比文献[8]中描述的试验梁加载过程中裂缝分布情况可知,数值模拟计算出的混凝土梁开裂情形与试验结果一致,裂缝分布的范围基本相同,接近支座部位裂缝开展不深,而跨中位置裂缝已开展至梁顶,发育较完全。由图8可见,计算得出梁跨中截面上部混凝土

土应力达到单轴极限抗压强度,认定被压碎,与试验结果一致。图9表明受压区、受拉区纵向钢筋跨中部分应力均达到屈服强度492和427 MPa,认定已屈服,与试验结果相同,这也从侧面解释了跨中区裂缝开展很深的合理性。因此,数值模拟得出的再生砖粗骨料混凝土梁受弯破坏时裂缝发展情况与应力状态均能比较准确地反映实际情况。

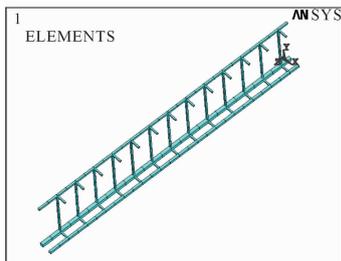


图5 钢筋有限元模型

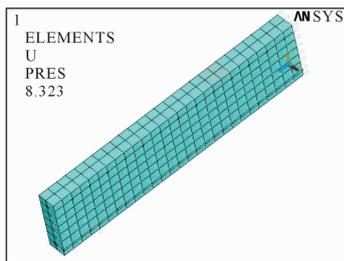


图6 混凝土有限元模型

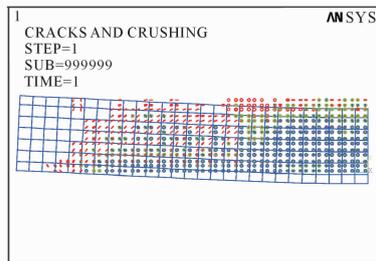


图7 极限荷载时混凝土梁的裂缝分布情况

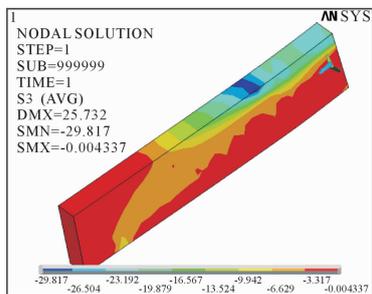


图8 混凝土梁第三主应力云图

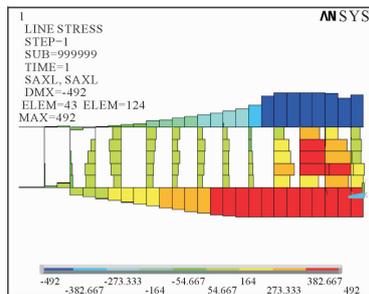


图9 钢筋应力图

2.4.3 荷载-跨中挠度关系曲线的对比分析 图10给出了荷载-跨中挠度关系曲线有限元计算结果和试验结果的对比。可以看出,两条曲线吻合较好。在受拉区钢筋屈服、混凝土梁接近极限荷载时,有限元计算的挠度值略大于试验实测值,这是由于试验过程挠度观测时,考虑到数据观测的安全性以及对试验仪器的保护,在试验梁达到极限荷载之前已经移除了百分表等挠度观测仪器,所以造成挠度的试验实测值不太全面,结果偏小。另一个原因是缺乏再生砖粗骨料混凝土单轴应力-应变全曲线数据,模拟时仅考虑了微下降段,这也会造成计算挠度值结果偏大。

从以上开裂弯矩、极限弯矩、裂缝分布、应力状态以及荷载-跨中挠度关系曲线有限元计算结果和试验结果的对比可见,有限元计算的参数设置合理,模拟有效,结果可靠,可较好的再现再生砖粗骨料混凝土梁的受弯性能。

3 承载力影响因素分析

本部分为 ANSYS 有限元拓展性分析,通过改变

钢筋直径,利用已建再生砖粗骨料混凝土梁模型,研究再生砖粗骨料替代率和纵向受拉钢筋配筋率对混凝土梁承载力的影响规律。

本次仿真试验共设计30根再生砖粗骨料混凝土梁,再生砖粗骨料替代率 r 影响因素水平取0%、30%、50%、70%和100%,纵向受拉钢筋由最初的3 Φ 14分别调整为3 Φ 12、2 Φ 12&1 Φ 14、2 Φ 14&1 Φ 12、2 Φ 14&1 Φ 16、2 Φ 16&1 Φ 14和3 Φ 16六种情况,与之对应配筋率 ρ 影响因素水平分别取为0.90%、1.01%、1.12%、1.36%、1.48%和1.61%,其他参数不变。计算得到的极限弯矩与跨中极限挠度值如表5所示。

3.1 再生砖粗骨料替代率的影响

根据表5,绘制再生砖粗骨料替代率与混凝土梁的极限弯矩与跨中极限挠度的关系分别见图11、12。

3.1.1 再生砖粗骨料替代率对混凝土梁极限弯矩的影响 由图11可以看出,当纵向受拉钢筋配筋率低于1.12%时,不同再生砖粗骨料替代率下混凝土梁的极限弯矩基本保持不变;当配筋率高于1.12%时,混凝土梁的极限弯矩在再生砖粗骨料替代率为

表5 再生砖粗骨料混凝土梁极限弯矩和跨中极限挠度计算值 % , kN · m, mm

试验梁 编号	再生砖粗骨 料替代率	纵向受拉钢 筋配筋率	M_u^c	跨中极 限挠度	试验梁 编号	再生砖粗骨 料替代率	纵向受拉钢 筋配筋率	M_u^c	跨中极 限挠度
O3F-0	0	0.90	36.04	24.58	H1F-0	0	1.36	46.93	29.74
O3F-30	30	0.90	37.02	20.99	H1F-30	30	1.36	44.75	20.34
O3F-50	50	0.90	35.71	38.10	H1F-50	50	1.36	45.52	49.07
O3F-70	70	0.90	35.51	41.45	H1F-70	70	1.36	46.47	76.54
O3F-100	100	0.90	35.56	50.33	H1F-100	100	1.36	50.51	111.90
O2F-0	0	1.01	39.06	46.55	H2F-0	0	1.48	49.03	30.86
O2F-30	30	1.01	39.26	36.37	H2F-30	30	1.48	48.30	22.42
O2F-50	50	1.01	38.64	45.97	H2F-50	50	1.48	49.48	40.46
O2F-70	70	1.01	39.42	65.69	H2F-70	70	1.48	50.62	57.49
O2F-100	100	1.01	39.47	72.84	H2F-100	100	1.48	51.20	80.69
O1F-0	0	1.12	41.89	45.68	H3F-0	0	1.61	51.85	31.67
O1F-30	30	1.12	41.59	32.57	H3F-30	30	1.61	49.58	21.89
O1F-50	50	1.12	41.32	45.91	H3F-50	50	1.61	53.51	38.82
O1F-70	70	1.12	41.83	79.16	H3F-70	70	1.61	53.79	56.36
O1F-100	100	1.12	43.36	95.62	H3F-100	100	1.61	52.66	76.30

30%时最低,之后随着替代率的增加不断增大,当替代率为50%以上时增幅变缓,承载力较高,且总体上均高于普通混凝土梁的极限弯矩,与试验结果一致。分析其原因,认为当纵向受拉钢筋配筋率较低时,混凝土梁的受力性能较差,掩盖了不同混凝土材料的影响;但当配筋率较高时,混凝土梁的受力性能得到充分发挥,不同再生砖粗骨料替代率的影响能够充分体现,高替代率下的混凝土梁表现出了较高的受弯承载力。

3.1.2 再生砖粗骨料替代率对混凝土梁跨中极限挠度的影响 由图12可知,混凝土梁的跨中极限挠度随着再生砖粗骨料替代率的增加而增大,这表明再生砖粗骨料混凝土梁的刚度小于普通混凝土梁,且反映出混凝土梁的弹性模量随着再生砖粗骨料替代率的增加而减小。但当替代率为30%时极限挠度最低,且低于普通混凝土梁,这是由于当再生砖粗骨料替代率为30%时混凝土梁极限抗弯承载力明显偏低,受力性能不够稳定,而混凝土梁的极限承载力对其挠度影响较大,极限承载力越低,梁跨中挠度

越小^[8]。
3.2 纵向受拉钢筋配筋率的影响

根据表5,绘制纵向受拉钢筋配筋率与混凝土梁的极限弯矩与跨中极限挠度的关系见图13、14。

3.2.1 纵向受拉钢筋配筋率对混凝土梁极限弯矩的影响 由图13可以看出,混凝土梁的极限弯矩随着配筋率的增加而增大,不同再生砖粗骨料替代率的混凝土梁变化趋势相同,且整体呈线性关系。这表明纵向受拉钢筋配筋率对混凝土梁的极限承载力影响显著,受拉区钢筋用量在改善梁的受力性能方面作用很大。

3.2.2 纵向受拉钢筋配筋率对混凝土梁跨中极限挠度的影响 由图14可知,各再生砖粗骨料替代率的混凝土梁跨中极限挠度均随着纵向受拉钢筋配筋率的增加先增大后减小,但跨中极限挠度曲线的峰值点对应的配筋率范围有所不同,当再生砖粗骨料替代率较低(30%及以下),配筋率在1.01%左右时混凝土梁的跨中极限挠度最大;而当再生砖粗骨料替代率高于50%,配筋率在1.23%~1.36%范围内

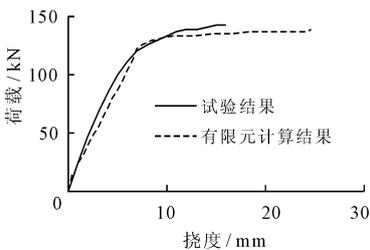


图10 荷载-跨中挠度关系曲线的对比

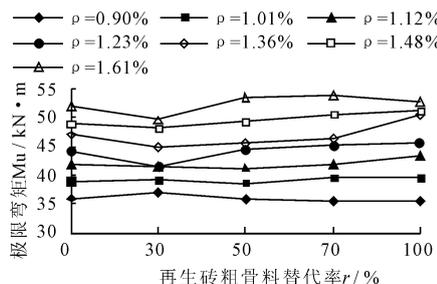


图11 替代率与极限弯矩的关系

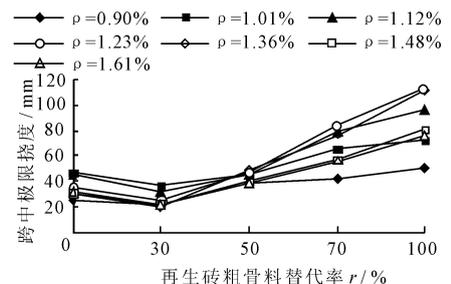


图12 替代率与跨中极限挠度的关系

时会出现混凝土梁的跨中极限挠度曲线峰值点。从中可以看出,当钢筋与再生砖粗骨料混凝土两种材料各自的力学性能均能得到充分发挥的时候,才可以较好地体现混凝土梁的延性。

3.3 正截面受弯极限承载力计算公式中再生砖粗骨料影响系数的分析

文献[9]提出了再生砖粗骨料混凝土梁正截面承载力计算公式,并且选取再生砖粗骨料抗弯承载力影响系数 $k=0.3$ 。本研究综合考虑各再生砖粗骨料替代率的试验梁数值模拟极限弯矩与试验实测值的相对误差(表4),将表5中不同再生砖粗骨料替代率与纵向受拉钢筋配筋率的混凝土梁极限弯矩计算值作

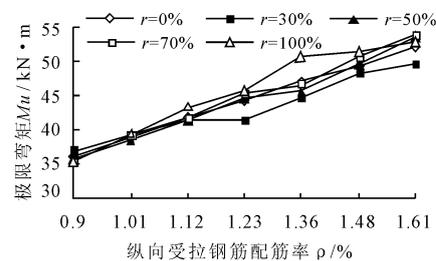


图13 配筋率与极限弯矩的关系

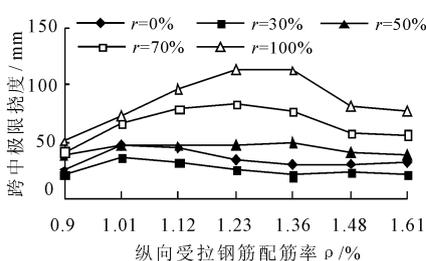


图14 配筋率与跨中极限挠度的关系

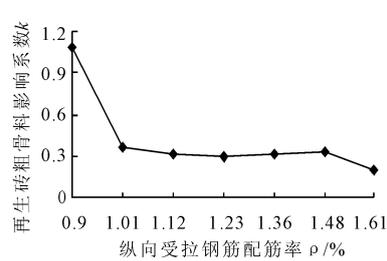


图15 纵向受拉钢筋配筋率与再生砖粗骨料影响系数k的关系

由图可知, k 的取值整体上随着纵向受拉钢筋配筋率的增加而减小,在1.01~1.48%的配筋率范围内稳定较好,波动极小,配筋率低于1.01%时 k 值很大,而配筋率高于1.48%时 k 值有减小的趋势。分析其原因,配筋率过低时混凝土梁的承载能力取决于再生砖粗骨料混凝土的力学性能,而配筋率过高时,钢筋对梁的受力性能影响过大,只有当配筋率适中,钢筋与再生砖粗骨料混凝土两种材料均能充分发挥各自的受力性能,对混凝土梁承载能力的影响也比较稳定。因此,选取纵向受拉钢筋配筋率范围1.01~1.48%内的均值0.33作为 k 值,比较准确、可靠。

4 结 语

(1) 再生砖粗骨料混凝土梁受弯时的开裂弯矩与极限弯矩有限元计算值略小于试验实测值,相对误差均在10%以内,数值模拟的裂缝分布情况与试验结果一致,且载荷-跨中挠度关系曲线吻合较好,说明有限元数值分析可以有效地模拟再生砖粗骨料混凝土梁的受弯性能。

(2) 当纵向受拉钢筋配筋率高于1.12%时,再生砖粗骨料替代率对混凝土梁极限弯矩的影响较明显,在替代率为30%时极限弯矩最低,之后随着替

进一步修正,以更加可靠地代表不同再生砖粗骨料替代率与配筋率的混凝土梁极限弯矩的试验实测值。通过回归分析方法,计算出不同纵向受拉钢筋配筋率下的再生砖粗骨料影响系数 k ,见表6。

表6 不同纵向受拉钢筋配筋率下的再生砖粗骨料影响系数

纵向受拉钢筋配筋率 ρ	0.90	1.01	1.12	1.23	1.36	1.48	1.61
再生砖粗骨料影响系数 k	1.08	0.37	0.32	0.31	0.32	0.33	0.21

根据表6,绘制不同纵向受拉钢筋配筋率与再生砖粗骨料影响系数 k 的关系见图15。

代率的增加不断增大;随着再生砖粗骨料替代率的增加,跨中极限挠度先减小后增大。

(3) 再生砖粗骨料混凝土梁的极限弯矩随着纵向受拉钢筋配筋率的增加而增大,不同再生砖粗骨料替代率的混凝土梁变化趋势相同,且基本呈线性关系;混凝土梁的跨中极限挠度随着配筋率的增加先增大后减小,且曲线峰值点对应的配筋率有随着再生砖粗骨料替代率的增加逐渐增大的趋势。

(4) 再生砖粗骨料抗弯承载力影响系数 k 的取值整体上随着纵向受拉配筋率的增加而减小,在1.01~1.48%的配筋率范围内稳定较好,选取此范围内均值0.33作为 k 值,比较准确、可靠。

(5) 钢筋与再生砖粗骨料混凝土的黏结与滑移对混凝土梁有限元分析的影响等问题,值得今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈树建,翟爱良,季昌良,等. 混合再生骨料混凝土配制技术试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(3): 96-101.
- [2] Cachim P B. Mechanical properties of brick aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3):1292-1297.

- [3] 刘子振,肖斌,李晓龙,等. 废旧烧结砖再生混凝土性能试验研究[J]. 混凝土,2011(3):72-74.
- [4] 严捍东,陈秀峰. 废弃黏土砖再生骨料对混凝土性能的影响研究[J]. 四川建筑科学研究,2009,35(5):179-182.
- [5] 王长生. 再生粘土砖混凝土性能试验[J]. 房材与应用,2001,29(1):44-45.
- [6] Naceri A, Hamina M C. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar [J]. Waste Management, 2009,29(8):2378-2384.
- [7] 宗兰,余倩,张士萍. 碎砖类骨料再生混凝土的力学性能研究[J]. 混凝土,2013(6):52-54.
- [8] 季昌良,翟爱良,翟文举,等. 再生砖粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 水利水运工程学报,2012(6):59-64.
- [9] 季昌良,翟爱良,翟文举,等. 再生砖粗骨料混凝土梁正截面承载力试验与分析[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(4):72-76.
- [10] 王纯合,翟爱良,陈树建,等. 再生砖骨料混凝土梁斜截面抗剪承载力分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):151-154.
- [11] 刘世忠. 基于 ANSYS 的钢筋混凝土结构非线性有限元分析[J]. 四川建筑,2006,26(2):92-95.
- [12] 汪冬生,吴铁君. ANSYS 中的钢筋混凝土单元[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2004,28(4):526-529.
- [13] 王瑞娟. 再生混凝土梁抗剪性能试验研究及非线性有限元分析[D]. 天津:天津城市建设学院,2010.
- [14] 杜朝华. 建筑垃圾再生骨料混凝土及构件受力性能研究[D]. 郑州:郑州大学,2012.
- [15] 陈丹丹,孙红梅. 钢筋混凝土非线性有限元分析中剪力传递系数的研究[J]. 中国港湾建设,2013(4):36-37.
- [16] 赵亚敏,唐习龙. 基于 ANSYS 钢筋混凝土梁开裂有限元模拟研究[J]. 西部探矿工程,2007,19(12):231-233.

(上接第 199 页)

- [3] Sliemers A O, Derwort N, Gomez J L, et al. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. Water Research, 2002, 36(10):2475-2482.
- [4] Linping K, Willy V. Ammonium removal by the oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification system [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(11):4500-4506.
- [5] Jensen M M, Thamdrup B, Dalsgaard T. Effects of specific inhibitors on anammox and denitrification in marine sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(10):3151-3158.
- [6] Güven D, Dapena A, Kartal B, et al. Propionate oxidation by and methanol inhibition of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(2):1066-1071.
- [7] Chen H, Liu S, Yang F, et al. The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(4):1548-1554.
- [8] Wang D, Wang G, Xu X, et al. Multiple factors influencing anaerobic acidogenic pretreatment in an up-flow non-woven biofilm reactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 221(2):37-43.
- [9] 方晶晶,马传明,刘存富. 反硝化细菌研究进展[J]. 环境科学与技术,2010,33(6E):207-210+264.