

# 橡胶混凝土抗压性能及细观破坏机理研究

薛 刚,孙立所,许 胜,侯玮华

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

**摘 要** 目的 研究橡胶混凝土抗压性能及受压破坏机理,为橡胶混凝土路用提供理论基础. 方法 配制水灰比为 0.35、0.40、0.45,橡胶掺量为 0、10%、20%、30% 的橡胶混凝土,进行轴心抗压强度试验;基于细观层次,将橡胶混凝土看作由砂浆、粗骨料、橡胶颗粒、砂浆-粗骨料界面和砂浆-橡胶颗粒界面组成的多相复合材料,建立橡胶混凝土细观数值模型,模拟不同橡胶掺量和不同水灰比的橡胶混凝土轴心抗压强度. 结果 随着橡胶掺量的增加,轴心抗压强度逐渐降低,强度损失逐渐增大;橡胶掺量相同时,水灰比越小,抗压强度越大;水灰比相同时,随着橡胶掺量的增加,应力应变曲线越来越平缓,峰值应力、初始弹性模量、峰值变形模量逐渐减小;橡胶掺量相同时,水灰比越小,峰值应力、初始弹性模量、峰值变形模量越大;抗压强度模拟结果与试验结果符合较好,验证了细观模型的正确性. 结论 砂浆与橡胶颗粒的界面区域对橡胶混凝土轴心抗压强度和破坏过程影响较大;骨料和砂浆界面性能约为砂浆的 65%,橡胶和砂浆界面性能约为砂浆的 35%.

**关键词** 橡胶混凝土;抗压性能;细观;数值模拟

中图分类号 TU501

文献标志码 A

## Study on Compressive Properties and Meso Failure Mechanism of Rubber Concrete

XUE Gang, SUN Liso, XU Sheng, HOU Weihua

(School of Civil Engineering, University of Inner Mongolia Science and Technology, Baotou, China, 014010)

**Abstract:** The compressive properties and failure mechanism of rubber concrete are studied to provide theoretical basis for rubber concrete pavement. Rubber concrete with water cement ratio of respectively 0.35, 0.40 and 0.45 and rubber content of respectively 0, 10%, 20% and 30% were prepared to conduct axial compressive strength test. In the mesoscopic level, rubber concrete can be regarded as a multiphase composite material composed of mortar, coarse aggregate, rubber particles, mortar-coarse aggregate interface and mortar-rubber particle interface. The mesoscopic numerical model of rubber concrete was built to simulate the axial compressive strength of rubber

收稿日期:2019-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51868063)

作者简介:薛刚(1968—),男,教授,博士,主要从事结构振动与控制、高性能混凝土等方面研究.

concrete with different rubber contents and water cement ratios. The results show that with the increase of rubber content, the axial compressive strength decreases and the strength loss increases. When the rubber content is the same, the smaller the water cement ratio is, the greater the compressive strength is. At the same water cement ratio, with the increase of rubber content, the stress-strain curve becomes more and more gentle, and the peak stress, initial elastic modulus and peak deformation modulus gradually decrease. When the content of rubber is the same, the smaller the water cement ratio is, the larger the peak stress, the initial elastic modulus and the peak deformation modulus are. The simulation results of compressive strength are in good agreement with the experimental results, which verify the correctness of the meso model. The interface area between mortar and rubber particles has a great impact on the axial compressive strength and failure process of rubber concrete. The interface performance of aggregate and mortar is about 65% of that of mortar, and that of rubber and mortar is about 35% of that of mortar.

**Key words:** rubber concrete; compressive properties; mesoscopic; numerical simulation

近年来,随着中国经济的快速发展,中国汽车工业发展迅速,同时也导致废旧轮胎产量大幅度增加.把废旧轮胎加工成颗粒状,加入到混凝土中能够克服普通混凝土的缺陷,具有良好的力学性能<sup>[1-4]</sup>.同时将橡胶颗粒加入到混凝土中,可使橡胶颗粒与水泥基体界面处存在较大的孔隙<sup>[5]</sup>. S. MENDIS 等<sup>[6]</sup>进行橡胶混凝土力学性能试验研究,研究表明,不同配合比、不同橡胶掺量的等强度橡胶混凝土的抗压强度、弹性模量、应力-应变关系等力学性能相近.杨敏<sup>[7]</sup>等试验研究表明,与普通混凝土相比,橡胶混凝土的应力-应变曲线变化趋势趋于缓和,峰值应变和弹性模量都有所减小.杨春峰等<sup>[8]</sup>研究表明,与普通混凝土相比,橡胶混凝土的破坏过程中裂缝较多,变形较大.冯凌云等<sup>[9]</sup>研究了不同橡胶颗粒粒径和掺量对混凝土力学性能的影响,结果表明,随着橡胶掺量的增加,橡胶混凝土力学强度逐渐减小.

混凝土材料的力学性能研究可以分为微观层次、细观层次以及宏观层次.混凝土细、微观组成决定了宏观上复杂的力学性能.刘春生等<sup>[10]</sup>基于细观层次模拟橡胶混凝土立方抗压性能,研究表明,随着橡胶掺量的增加,橡胶混凝土抗压强度不断降低.刘峰等<sup>[11]</sup>建立橡胶混凝土数值模型,模拟轴向荷载作用下橡胶混凝土力学性能,结果表明,二

维细观数值模型计算速度较快并且计算结果与试验结果符合较好.王娟等<sup>[12]</sup>建立考虑初始缺陷的橡胶混凝土细观数值模型,模拟橡胶混凝土轴心抗压强度和破坏过程.乔卫国等<sup>[13]</sup>采用正交试验方法,研究表明水灰比和橡胶掺量是影响橡胶混凝土强度的主要因素.

基于此,笔者对不同水灰比和不同橡胶掺量的橡胶混凝土进行抗压强度试验,分析水灰比和橡胶掺量对橡胶混凝土抗压强度的影响规律;利用随机骨料模型<sup>[14]</sup>,建立了考虑两种不同界面的橡胶混凝土细观数值模型,模拟3种水灰比和4种橡胶掺量的橡胶混凝土轴心抗压强度,分析橡胶混凝土轴心受压裂缝扩展过程和破坏机理.研究表明:橡胶混凝土轴心抗压强度的降低与橡胶颗粒-砂浆界面过渡区的强度较低有关;橡胶混凝土轴心受压破坏形态与橡胶颗粒及粗骨料的位置有关.

## 1 橡胶混凝土轴心抗压强度试验

### 1.1 试验材料

(1)水泥采用P·O 42.5R普通硅酸盐水泥.其性能指标如表1所示.

(2)粗骨料采用石灰岩碎石,粒径为5~25 mm,其物理性能如表2所示.

(3)细骨料采用河砂,其物理性能如表3所示.

表1 P·O 42.5R 水泥的性能指标

Table 1 Performance index of P·O 42.5R cement

指标	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	细度/%	安定性	初凝时间/	终凝时间/	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
				min	min	3d	28d	3d	28d
测试结果	3.15	2.23	合格	131	175	26.39	53.28	5.78	8.67

表2 粗骨料物理性能

Table 2 Physical properties of coarse aggregate

粒径/ mm	表观密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	压碎指 标/%	孔隙 率/%
5~25	2 683	1545	9.68	44

表3 细骨料物理性能

Table 3 Physical properties of fine aggregate

细度 模数	表观密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	含泥 量/%	孔隙 率/%
2.79	2 618	1 512	2.3	33

(4)橡胶颗粒大小为1.7~4 mm.堆积密度为610 kg/m<sup>3</sup>.

1.2 试验配合比

混凝土设计强度等级为C40.分别以0%、10%、20%、30%的掺量等体积取代砂,配合比如表4所示.

表4 橡胶混凝土配合比

Table 4 The mix ratio of rubber concrete

水灰比	体积质量/(kg·m <sup>-3</sup> )					
	水泥	橡胶	砂	石	水	减水剂
0.35	400	0	769	1 155	140	5.0
0.35	400	31.39	695	1 155	140	4.8
0.35	400	62.68	617	1 155	140	4.5
0.35	400	93.76	541	1 155	140	4.3
0.4	400	0	798	1 106	160	3.8
0.4	400	32.56	719	1 106	160	3.5
0.4	400	65.37	641	1 106	160	3.3
0.4	400	97.65	561	1 106	160	2.9
0.45	400	0	831	1 058	180	2.3
0.45	400	33.87	750	1 058	180	2.1
0.45	400	67.64	670	1 058	180	1.9
0.45	400	101.73	579	1 058	180	1.1

1.3 工作性能

试验通过改变减水剂的用量,控制坍落度,观察混凝土状态来保证新拌混凝土良好

的工作性能.测定3种水灰比、4种橡胶掺量的橡胶混凝土坍落度如表5所示.

表5 橡胶混凝土坍落度

Table 5 Slump of rubber concrete

水灰比	橡胶掺量/%	坍落度/mm
0.35	0	41
0.35	10	49
0.35	20	53
0.35	30	56
0.40	0	45
0.40	10	52
0.40	20	57
0.40	30	64
0.45	0	50
0.45	10	60
0.45	20	68
0.45	30	76

1.4 试验方法

试验参照规范中混凝土轴心抗压强度试验中有关规定进行,试件采用标准试件150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体,共制作36个试件.应变片采取双面中心对称布置方式测纵向变形,使用液压试验机加载,使用动态应变仪采集试验数据.加载速度参考文献<sup>[15]</sup>中最适宜的加载速度,取0.05 MPa/s.橡胶混凝土试件的轴心抗压强度损失*k*按式(1)计算.

$$k = (1 - \frac{f_{rc}}{f_{cc}}) \times 100\% . \tag{1}$$

式中:*f<sub>rc</sub>*为橡胶混凝土轴心抗压强度,MPa;*f<sub>cc</sub>*为基准混凝土轴心抗压强度,MPa.

2 试验结果及分析

2.1 抗压强度与强度损失

橡胶混凝土轴心抗压强度和强度损失具体数值见表6.由表6可以看出,随着橡胶掺

量的增加,轴心抗压强度逐渐降低,强度损失也逐渐增大,与相关文献[16-18]结论一致.水灰比为0.35时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土轴心抗压强度降低44.8%.水灰比为0.40时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土轴心抗压强度降低45.2%.水灰比为0.45时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土轴心抗压强度降低41.7%.橡胶掺量相同时,水灰比越小,抗压强度越大.

表6 橡胶混凝土轴心抗压强度和强度损失

Table 6 Axial compressive strength and strength loss of rubber concrete

水灰比	橡胶掺量/%	轴心抗压强度/MPa	强度损失/%
0.35	0	62.64	0
0.35	10	52.51	16.2
0.35	20	42.45	32.3
0.35	30	34.62	44.8
0.40	0	57.24	0
0.40	10	48.76	14.8
0.40	20	40.02	30.1
0.40	30	31.36	45.2
0.45	0	50.17	0
0.45	10	41.28	17.7
0.45	20	37.64	25.0
0.45	30	29.26	41.7

2.2 应力-应变曲线

根据采集仪采集的数据做出不同水灰比的橡胶混凝土应力-应变曲线上段如图1所示.从图中可以看出,水灰比相同时,随着橡胶掺量的增加,应力应变曲线越来越平缓,表明在相同应力下,橡胶掺量越多,应变越大.不同水灰比的橡胶混凝土的应力-应变曲线的趋势基本一致,先是直线上升,后慢慢变得平缓.基准混凝土的应力-应变曲线的陡峭程度总是大于橡胶混凝土.这说明加入橡胶颗粒会降低混凝土的初始弹性模量,即表现为橡胶混凝土的弹性模量小于基准混凝土.

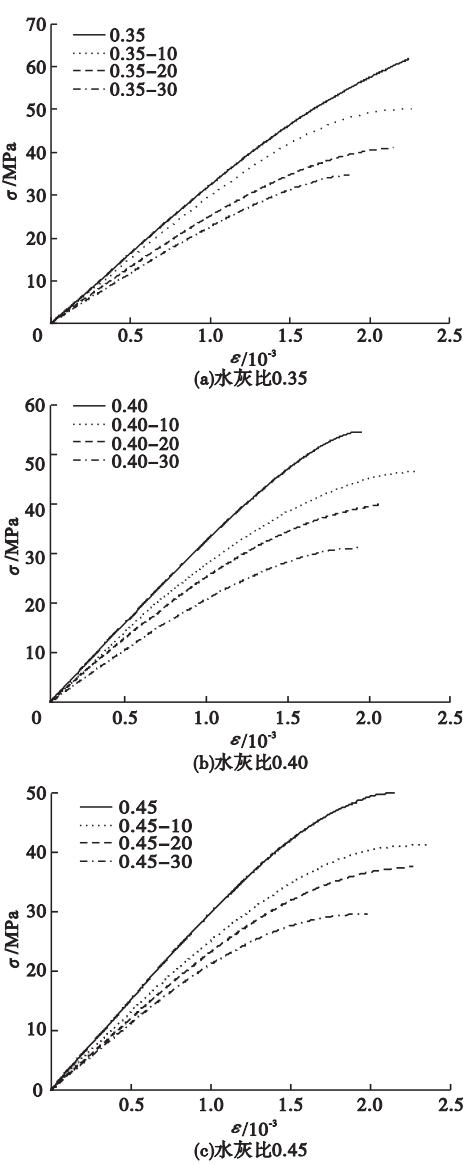


图1 橡胶混凝土应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of rubber concrete

2.3 橡胶混凝土强度及变形性能

弹性模量是反映混凝土材料变形能力的力学性能指标.橡胶颗粒本身具有较小的弹性模量,掺入混凝土中能够改善混凝土的变形性能,增大其延性.选取上升段 $0.4f_c$ 时的割线模量作为橡胶混凝土初始弹性模量,计算式见式(2).橡胶混凝土抗压峰值变形模量计算式见式(3).橡胶混凝土的轴心抗压强度(峰值应力)、峰值应变、初始弹性模量和峰值变形模量随水灰比和橡胶掺量变化情况见表7.

$$E_c^T = E_{0.4}^T = \frac{0.4f_c^T}{\varepsilon_{0.4}^T}.$$

(2)

式中: $E_c^T$  为弹性模量,MPa; $E_{0.4}^T$  为初始弹性模量,MPa; $f_c^T$  为轴心抗压强度,MPa; $\varepsilon_{0.4}^T$  为  $0.4f_c^T$  所对应的应变值, $10^{-3}$ .

$$E^T = \frac{f_c^T}{\varepsilon^T}.$$

(3)

式中: $E^T$  为应力峰值点的割线弹性模量,MPa; $f_c^T$  为轴心抗压强度,MPa; $\varepsilon^T$  为峰值应变,即最大应力时对应的应变值, $10^{-3}$ .

表7 橡胶混凝土强度及变形性能参数

Table 7 Strength and deformation parameters of rubber concrete

水灰比	橡胶掺量/%	峰值应变/ $10^{-3}$	峰值应力/MPa	初始弹性模量/ $10^3$ MPa	峰值变形模量/ $10^3$ MPa
0.35	0	2.237	62.64	33.480	28.013
0.35	10	2.264	52.51	31.746	23.194
0.35	20	2.144	42.45	27.162	19.795
0.35	30	1.873	34.62	23.629	18.482
0.40	0	2.104	57.24	31.795	27.201
0.40	10	2.457	48.76	29.301	19.841
0.40	20	2.235	40.02	25.376	17.911
0.40	30	2.082	31.36	21.892	15.067
0.45	0	2.035	50.17	29.803	24.658
0.45	10	2.383	41.28	26.278	17.327
0.45	20	2.269	37.64	24.258	16.588
0.45	30	1.987	29.26	19.932	14.721

从表7可以看出,随着橡胶掺量的增加,峰值应力逐渐下降.水灰比为0.35时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土峰值应力降低44.7%.水灰比为0.40时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土峰值应力降低45.2%.水灰比为0.45时,橡胶掺量

由0%增加到30%时,橡胶混凝土峰值应力降低41.7%.橡胶掺量相同时,水灰比越小,橡胶混凝土的峰值应力越大.

随着橡胶掺量的增加,初始弹性模量逐渐下降.水灰比为0.35时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土抗压初始弹性模量损失29.4%.水灰比为0.40时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土抗压初始弹性模量损失31.1%.水灰比为0.45时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土抗压初始弹性模量损失33.1%.橡胶掺量相同时,水灰比越小,橡胶混凝土的初始弹性模量越大.

随着橡胶掺量的增加,峰值变形模量逐渐下降.水灰比为0.35时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土抗压峰值变形模量损失34.0%.水灰比为0.40时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土抗压峰值变形模量损失44.6%.水灰比为0.45时,橡胶掺量由0%增加到30%时,橡胶混凝土抗压峰值变形模量损失40.3%.橡胶掺量相同时,水灰比越小,橡胶混凝土的峰值变形模量越大.

3 橡胶混凝土细观数值模型

3.1 橡胶颗粒和骨料的生成和投放

使用富勒曲线平面转化的瓦拉文公式计算出任一点具有骨料粒径 $d < d_0$ 的概率 $p_c$ .橡胶颗粒的面积含量采用体积含量近似代替.利用ABAQUS的二次开发程序,采用蒙特卡罗法,使用Python编写程序,生成橡胶混凝土二维随机骨料模型如图2所示.

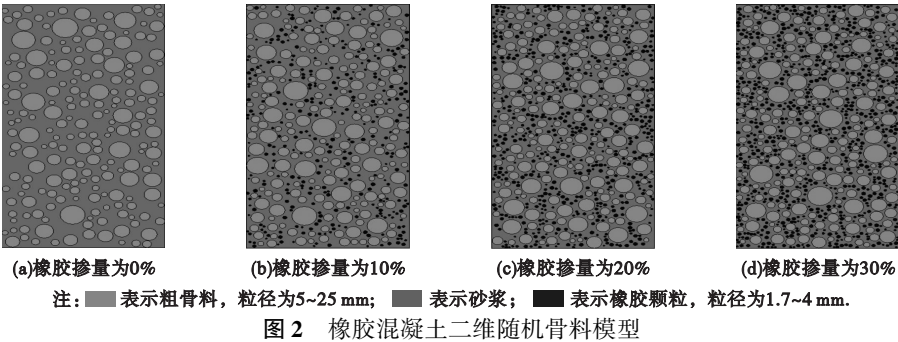


Fig. 2 Two-dimensional random aggregate model of rubber concrete



3.2 细观组分本构关系

粗骨料和橡胶采用线弹性本构模型,如图3所示,其本构方程为式(4).砂浆和两种界面采用混凝土损伤塑性模型,如图4、图5所示,其本构方程如式(5)、式(6).

$$\sigma = E_0 \varepsilon. \tag{4}$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}). \tag{5}$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}). \tag{6}$$

式中: $\sigma$ 为应力,MPa; $E_0$ 为初始弹性模量,MPa; $\varepsilon$ 为应变; $\sigma_t$ 为拉应力,MPa; $\sigma_c$ 为压应力,MPa; $d_t$ 为拉伸损伤因子; $d_c$ 为压缩损伤因子; $\varepsilon_t$ 为拉应变; $\varepsilon_c$ 为压应变; $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ 为拉伸等效塑性应变; $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ 为压缩等效塑性应变.

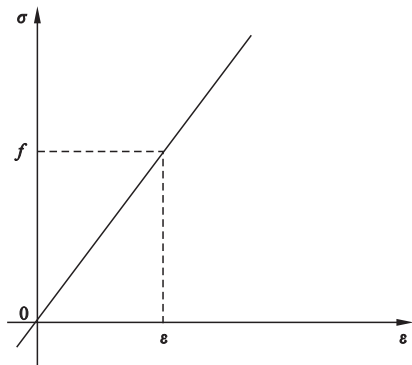


图3 粗骨料与橡胶颗粒的本构模型

Fig.3 Constitutive model of coarse aggregate and rubber particles

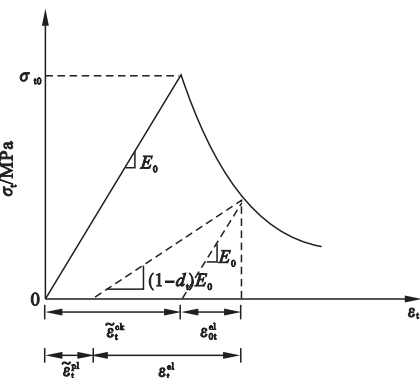


图4 砂浆和界面的拉伸本构模型

Fig.4 Tensile constitutive model of mortar and interface

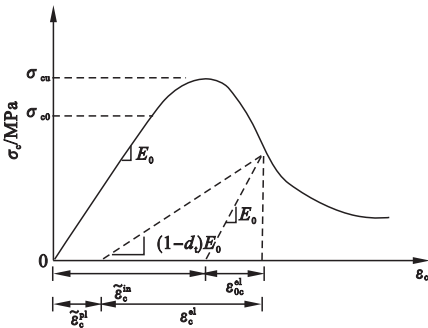


图5 砂浆和界面的压缩本构模型

Fig.5 Compression constitutive model of mortar and interface

3.3 材料参数的选取

橡胶颗粒和骨料的材料参数参考文献[19]中的材料参数.砂浆的力学性能参数参考文献[20]中的经验公式,由灰水比  $c/w$  确定,如式(7)~式(9)所示.橡胶混凝土细观数值模型的材料参数详见表8~表9.

表8 主要材料力学性能参数

Table 8 Mechanical properties of main materials				
组成	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
橡胶	0.07	0.5	2.6	26
粗骨料	48	0.18	11	136

表9 不同水灰比下砂浆力学性能参数

Table 9 Mechanical properties of mortar with different water cement ratio				
水灰比	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
0.35	24.6	0.2	3.98	50.15
0.40	23.4	0.2	3.75	42.50
0.45	22.2	0.2	3.54	36.64

参考文献[21],骨料和砂浆界面性能取砂浆的65%,刘保东等<sup>[22]</sup>研究橡胶骨料类型和界面对橡胶混凝土力学性能的影响,结果表明,界面过渡区强度较低是橡胶混凝土力学性能下降的原因.笔者在文中将橡胶和砂浆界面性能取砂浆的35%.

$$c/w = 0.047 f_{cm} + 0.5. \tag{7}$$

$$f_{tp} = 1.4 \ln f_{cm} - 1.5. \tag{8}$$

$$E_m = 1\,000(7.7 \ln f_{cm} - 5.5). \tag{9}$$

式中: $c/w$  为砂浆灰水比; $f_{tp}$  为砂浆抗拉强度,MPa; $E_m$  为砂浆弹性模量,MPa; $f_{cm}$  为砂浆抗压强度,MPa.

4 橡胶混凝土抗压性能细观模拟

4.1 抗压强度数值模拟结果

位移边界条件为试件的底部设置竖向位移约束,水平方向不设置约束.采用位移控制加载,设定加载速度 0.01 mm/s,加载位移 5 mm.对不同水灰比和不同橡胶掺量的混凝土进行轴心抗压强度数值模拟,得出 3 种水灰比、4 种橡胶掺量的橡胶混凝土轴心抗压强度数值模拟结果,与试验结果对比如表 10 所示.模拟结果与试验结果相对误差在 3% 以内,模型的可靠性得以验证.

表 10 橡胶混凝土轴心抗压强度数值模拟结果与试验结果对比

Table 10 The axial compressive strength comparison between numerical simulation results and test results of rubber concrete

水灰比	橡胶掺量/%	抗压强度/MPa		相对误差/%
		模拟	试验	
0.35	0	63.51	62.64	1.4
0.35	10	53.42	52.51	1.7
0.35	20	43.34	42.45	2.1
0.35	30	35.67	34.62	2.9
0.40	0	58.18	57.24	1.6
0.40	10	49.58	48.76	1.7
0.40	20	40.89	40.02	2.1
0.40	30	32.14	31.36	2.4
0.45	0	51.03	50.17	1.7
0.45	10	42.03	41.28	1.8
0.45	20	38.41	37.64	2.0
0.45	30	30.02	29.26	2.5

为研究细观数值模型的适用性,根据文献[23],建立相对应的细观数值模型.模拟橡胶粒径为 1~3 mm,掺量分别为 0%、10%、20%、30% 的混凝土,数值模拟结果及试验结果如表 11 所示,模拟结果与试验结果相对误差在 5% 以内,模型的适用性得以验证.

表 11 数值模拟结果与试验结果对比

Table 11 Comparison between numerical simulation results and test results

水灰比	橡胶掺量/%	抗压强度/MPa		相对误差/%
		模拟	试验	
0.57	0	18.63	18.15	2.6
0.57	10	16.64	16.06	3.5
0.57	20	13.47	12.94	3.9
0.57	30	12.03	11.45	4.8

4.2 橡胶混凝土轴心受压裂纹拓展过程和破坏机理

图 6 所示为水灰比 0.40、橡胶掺量为 30% 的橡胶混凝土轴心受压破坏不同加载阶段的数值模拟结果.从图中可以看出:加载初期,荷载值较小,各相材料中强度相对较小的橡胶-砂浆界面单元首先发生损伤,裂纹首先出现在橡胶颗粒的周围.随着荷载的增加,更多橡胶颗粒周围出现裂纹,同时骨料周围也开始出现裂纹.荷载进一步增加后,裂纹不断增多并向砂浆区域拓展.最终,裂纹不断变宽,形成贯通的裂缝,试件因整体性遭受破坏而丧失承载能力.因为骨料强度和断裂能较高,橡胶混凝土轴心受压过程中骨料都不会发生断裂.橡胶混凝土轴心受压裂纹的拓展过程与橡胶颗粒和骨料的位置有较大关系<sup>[24-25]</sup>.

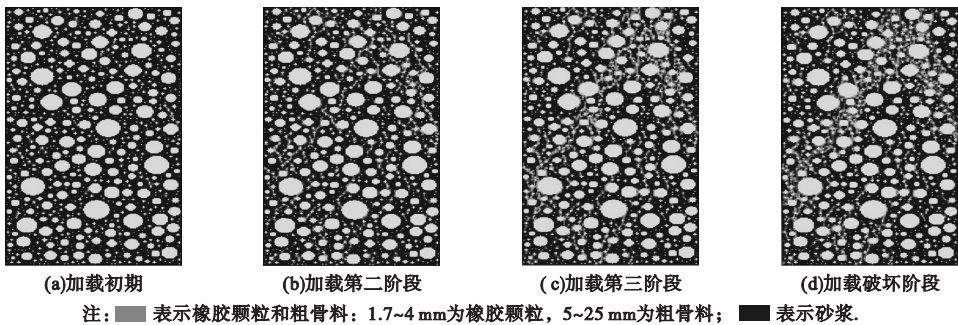


图 6 橡胶混凝土轴心受压破坏过程数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of failure process when rubber concrete under axial compression

## 5 结 论

(1) 对不同水灰比和不同橡胶掺量的橡胶混凝土进行抗压强度试验,从试验结果可以看出,水灰比和橡胶掺量对橡胶混凝土抗压性能具有较大影响。

(2) 建立了考虑两种界面的橡胶混凝土细观数值模型。骨料和砂浆界面性能取砂浆的65%,橡胶和砂浆界面性能取砂浆的35%,数值模拟结果与试验结果误差不大,验证了笔者建立的橡胶混凝土细观数值模型的可靠性和适用性。

(3) 橡胶颗粒与砂浆界面的界面区域对橡胶混凝土轴心抗压强度和破坏过程影响较大,因此在橡胶混凝土细观数值模拟时应单独考虑橡胶颗粒与砂浆的界面。笔者未考虑初始缺陷对橡胶混凝土轴心受压性能的影响,下一步将在建立细观数值模型时考虑初始缺陷来得到更好的模拟结果。

## 参考文献

- [1] 许金余,李赞成,罗鑫. 橡胶混凝土抗冻性的对比研究[J]. 硅酸盐通报,2014,33(4):800-805.  
(XU Jinyu, LI Zancheng, LUO Xin. Comparative study on the frost-resisting of rubber powder concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2014, 33(4): 800-805.)
- [2] 薛凯,朱涵,李浩然,等. 橡胶膨胀混凝土抗裂性能和力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品,2014(1):12-14.  
(XUE Kai, ZHU Han, LI Haoran, et al. Research on crack resistance and mechanical properties of rubber expansive concrete [J]. China concrete and cement products, 2014(1): 12-14.)
- [3] 闻洋,刘培培. 橡胶混凝土抗冲击性能研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(3):792-799.  
(WEN Yang, LIU Peipei. Impact resistance research on rubberized concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2018, 37(3): 792-799.)
- [4] 王龙,范璐璐. 橡胶颗粒水泥混凝土与基质混凝土路用性能对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):77-81.  
(WANG Long, FAN Lulu. Analysis of road performance between rub-concrete and general concrete materials [J]. Journal of Harbin

- institute of technology, 2016, 48(3): 77-81.)
- [5] 张海波,管学茂,勾密峰,等. 橡胶集料对水泥砂浆孔结构的影响[J]. 材料导报,2013,27(7):126-129.  
(ZHANG Haibo, GUAN Xuemao, GOU Mifeng, et al. Influence of rubber aggregate on pore structure of cement mortar [J]. Materials reports, 2013, 27(7): 126-129.)
- [6] MENDIS S, AL-DEEN S, ASHRAF M. Behaviour of similar strength crumbed rubber concrete (CRC) mixes with different mix proportions [J]. Construction and building materials, 2017, 137: 354-366.
- [7] 杨敏. 废旧橡胶混凝土基本力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳大学,2012.  
(YANG Min. Research on basic mechanical performance of waste rubber concrete [D]. Shenyang: Shenyang University, 2012.)
- [8] 杨春峰,张坤,郑忠一,等. 废旧橡胶混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2015,27(3):243-246.  
(YANG Chunfeng, ZHANG Kun, ZHENG Zhongyi, et al. Basic mechanical performance of waste rubber concrete [J]. Journal of Shenyang university (natural science), 2015, 27(3): 243-246.)
- [9] 冯凌云,袁群,马莹,等. 橡胶混凝土力学性能的试验研究[J]. 长江科学院院报,2015,32(7):115-118.  
(FENG Lingyun, YUAN Qun, MA Ying, et al. Experimental study on mechanical properties of rubber concrete [J]. Journal of Yangtze River scientific research institute, 2015, 32(7): 115-118.)
- [10] 刘春生,朱涵,李志国. 橡胶集料混凝土抗压细观数值模拟[J]. 低温建筑技术,2006(2):1-3.  
(LIU Chunsheng, ZHU Han, LI Zhiguo. Numerical simulation on compression behavior of crumb rubber concrete [J]. Low temperature building technology, 2006(2): 1-3.)
- [11] 刘锋,钟根全,夏晓舟,等. 基于细观层次橡胶混凝土单轴受压力学分析[J]. 建筑材料学报,2010,13(6):733-738.  
(LIU Feng, ZHONG Genquan, XIA Xiaozhou, et al. Mechanical analysis of rubberized concrete subjected to uniaxial compression based on meso-level [J]. Journal of building materials, 2010, 13(6): 733-738.)
- [12] 王娟,管巧艳,冯凌云,等. 橡胶混凝土轴压强度细观数值仿真[J]. 中国科技论文,2016,11(13):1516-1519.  
(WANG Juan, GUAN Qiaoyan, FENG Lingyun, et al. Numerical modeling of rubber concrete at micro-scale [J]. Chinese scientific and technological papers, 2016, 11(13): 1516-1519.)
- [13] 乔卫国,王立华,林登阁,等. 橡胶颗粒混凝土最优配合比正交试验研究[J]. 混凝土,2014



- (10):89-92.  
(QIAO Weiguo, WANG Lihua, LIN Dengge, et al. Research on optimum of rubber concrete with orthogonal experimental design method [J]. Concrete, 2014(10):89-92.)
- [14] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. Computers and structures, 1999, 70(5):533-544.
- [15] 王军军,张仪华,秦文轩,等. 废旧橡胶混凝土力学性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7):2219-2223.  
(WANG Junjun, ZHANG Yihua, QIN Wenxuan, et al. Mechanical properties of rubber concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(7):2219-2223.)
- [16] 路沙沙,麻凤海,邓飞,等. 橡胶颗粒掺量、粒径影响橡胶混凝土性能的试验分析[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(10):2477-2483.  
(LU Shasha, MA Fenghai, DENG Fei, et al. Experimental analysis of crumb rubber concrete performance caused by content and grain diameter of rubber[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2014, 33(10):2477-2483.)
- [17] 葛文慧. 废弃橡胶混凝土的力学性能和断裂韧性及抗冻性能[J]. 合成橡胶工业, 2019(6):474-478.  
(GE Wenhui. Mechanical properties, fracture toughness and frost resistance of waste rubber concrete [J]. China synthetic rubber industry, 2019(6):474-478.)
- [18] 廖国维,阮盛华,曾岚,等. 低掺量橡胶混凝土单轴受压力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2016(1):16-19.  
(LIAO Guowei, RUAN Shenghua, ZENG Lan, et al. Experimental study on mechanical properties of low content rubber concrete subject to uniaxial compression[J]. Concrete, 2016(1):16-19.)
- [19] 杨朝霞. 橡胶混凝土强度细观机理研究[D]. 郑州:郑州大学, 2017.  
(YANG Zhaoxia. Study on the mechanism of rubber concrete strength [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.)
- [20] NAGAI K, SATO Y, UEDA T. Mesoscopic simulation of failure of mortar and concrete by 2D RBSM [J]. Journal of advanced concrete technology, 2004, 2(3):359-374.
- [21] 陈惠苏,孙伟,STROEVEN P. 水泥基复合材料界面对材料宏观性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(1):51-62.  
(CHEN Huisu, SUN Wei, STROEVEN P. Review on the study of ITZ on the macro properties of cementitious composites [J]. Journal of building materials, 2005, 8(1):51-62.)
- [22] 刘保东,冯明扬,林柏欢,等. 骨料类型及界面改善对橡胶混凝土力学性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(6):9-18.  
(LIU Baodong, FENG Mingyang, LIN Bohuan, et al. Effects of aggregate types and interface improvements on mechanical properties of crumb rubber concrete [J]. China railway science, 2019, 40(6):9-18.)
- [23] 袁群,冯凌云,袁宾,等. 橡胶颗粒粒径和掺量对混凝土性能的影响[J]. 人民黄河, 2013, 35(2):111-113.  
(YUAN Qun, FENG Lingyun, YUAN Bin, et al. Research on the effect of particle size and mixed quantity of rubber pelle on flesh concrete's property [J]. Yellow river, 2013, 35(2):111-113.)
- [24] 付传清,范少锋,邓学斌,等. 不同龄期橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2016(10):64-68.  
(FU Chuanqing, FAN Shaofeng, DENG Xuebin, et al. Experimental study on mechanical properties of rubber concrete with different curing age [J]. Concrete, 2016(10):64-68.)
- [25] 狄胜同,贾超,乔卫国,等. 橡胶集料混凝土细观损伤特性的加载速率效应[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019(6):1900-1910.  
(DI Shengtong, JIA Chao, QIAO Weiguo, et al. Loading rate effect of meso damage characteristics of crumb rubber concrete [J]. Journal of Jilin university (engineering and technology edition), 2019(6):1900-1910.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)