复 合 材 料 学 报 第 23 卷 第 6 期 12 月 2006 年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 6 December 2006

文章编号: 1000-3851(2006)06-0158-05

橡胶混凝土的抗裂性能和弯曲变形性能

亢景付*, 任海波, 张平祖
(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 通过净浆、砂浆和混凝土 3 个层面的试验研究, 探讨了橡胶混凝土的抗裂性能和弯曲变形特性。根据圆环试件的开裂时间, 对 3 种水灰比(0.3, 0.4, 0.5)水泥净浆中掺入不同体积含量橡胶颗粒(10%, 15%, 20%, 30%, 50%)后的开裂敏感性进行了对比分析。结果表明, 在水泥净浆中掺入橡胶颗粒可以显著延缓试件的开裂时间, 提高抗裂性, 延缓时间随着橡胶颗粒掺量的增加和水灰比的增大而延长。弯曲试验考察了 4 个橡胶颗粒体积含量(8%, 16%, 21.4%, 32%)砂浆试件和 3 个橡胶颗粒体积含量(10%, 12.5%, 15%)混凝土试件的弯曲变形性能。结果表明, 含橡胶颗粒的砂浆试件和混凝土试件在弯曲过程中会产生明显的塑性变形, 试件不会在承受最大荷载时产生脆性断裂, 而是经过较大的塑性变形后延性破坏。与基准试件相比, 砂浆试件和混凝土试件破坏时的极限变形值均有大幅度提高。

关键词: 复合材料; 橡胶混凝土; 水泥净浆; 砂浆; 抗裂; 弯曲变形
中图分类号: TU528.41; TB332 文献标识码: A

Cracking-resistance and flexural property of rubberized concrete

KANG Jingfu*, REN Haibo, ZHANG Pingzu
(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The cracking-resistance and flexural property of the rubberized concrete were investigated based on the tests of paste, mortar and concrete specimens. The cracking-resistance was evaluated based on the cracking time of a ring specimen, which was prepared by incorporating waste tire rubber particles in the cement paste, and three different water-cement ratios (0.3, 0.4, 0.5) and five different rubber volume fractions(10%, 15%, 20%, 30%, 50%) were used. The results show that the addition of rubber particles delays the cracking time and improves the cracking-resistance of the specimens and the delayed time increases with the increase of the water-cement ratio and the volume fraction of rubber particles. The flexural properties were evaluated based on the bending tests of both mortar and concrete, four rubber volume fractions (8%, 16%, 21.4%, 32%) were used for mortar and three rubber fractions (10%, 12.5%, 15%) for concrete. The results show that the rubberized mortar and concrete specimen exhibited ductile failure and underwent significant deformation before fracture. The ultimate deformations of both mortar and concrete specimen increase substantially compared to the control specimens.

Keywords: composites; rubberized concrete; cement paste; mortar; cracking resistance; flexural behavior

水泥混凝土是当今世界最主要的建筑材料, 具有许多其他建筑材料不能相比的优点, 但其抗拉强度低、脆性大、容易开裂。混凝土结构的裂缝问题以及由此产生的渗漏和耐久性问题一直是建筑工程界关注的焦点。为了提高混凝土的抗裂性, 人们进行了大量的科学研究, 如通过优化配合比减小混凝土的收缩, 通过纤维材料提高混凝土的抗拉强度和韧性, 通过高分子材料降低弹性模量、提高界面粘结强度和变形能力等。其中改善抗裂性能较为显著的是纤维混凝土, 如钢纤维混凝土、炭纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土等。但纤维在搅拌过程中容易结团并导致混凝土工作性和质量均匀性变差, 以及价格较贵等因素都限制了纤维混凝土的普遍应用。

橡胶混凝土是近年来在国际上备受关注的一种新型混凝土, 其基本配制原理是用废旧轮胎橡胶颗粒取代水泥混凝土中的部分粗骨料或砂。已有研究

收稿日期: 2006-01-11; 收修改稿日期: 2006-05-08
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679054)
通讯作者: 亢景付, 博士, 教授, 研究方向为混凝土性能 E-mail: kangjingfu@126.com

表明[1,2,3]，废旧轮胎橡胶颗粒物理化学性能稳定，表面粗糙，表观密度与水接近，与水泥浆体有比纤维更好的粘结力，能比较均匀地分布在混凝土中。橡胶颗粒的掺入虽然会降低混凝土的强度，但混凝土的韧性、变形能力、抗冲击性能和抗冻性能会有显著提高。在强度要求不高但抗裂防渗较为严格的结构中具有潜在工程应用前景。开展橡胶混凝土研究不仅具有工程实用意义，还可能为解决日益严重的废旧轮胎环境污染问题找到一条新的途径。

橡胶混凝土研究始于20世纪80年代末期，国外大多把强度作为橡胶混凝土的主要技术指标，抗裂机理和抗裂性能的研究相对较少[4]。国内橡胶混凝土研究刚刚开始，目前仅有少数文献报道[5,6]。本文中通过净浆试件的开裂敏感性试验和砂浆及混凝土试件的弯曲变形试验，对橡胶混凝土的变形性能和抗裂性能进行了初步探讨。

1 实 验

本实验所用水泥为天津产骆驼牌42.5级普通硅酸盐水泥。橡胶颗粒由天津科威橡胶厂提供，平均粒径为1.5 mm，表观密度为1050 kg/m^3。砂为普通河砂，细度模数2.55。粗骨料为D_{max}= 20 mm的碎石，减水剂为Sika2 3350型高效液体减水剂，固体含量为30%。

圆环抗裂约束试验是进行不同胶凝材料或复合胶凝材料硬化过程中的抗裂敏感性对比分析的常用方法[8]。参照美国道路工程协会AASHTO的标准，自制圆环抗裂试模由钢质内模、底板、外模和盖板等组成。钢质内模的外径为90 mm，有机玻璃外模内径140 mm。试件成型后在室内静置至终凝，而后拆除外模，并在试件上表面涂一层黄油限制顶面的水分蒸发。然后将试件连同内模和底板置于温度为(40？1) e，相对湿度40%～50%的恒温养护箱内。成型后圆环试件的壁厚为25 mm，高度为30 mm。

在水灰比分别为0.3、0.4和0.5的水泥净浆中掺入不同体积含量的橡胶颗粒(橡胶颗粒体积与浆体总体积之比V_R= 10%、15%、20%、30%和50%)成型圆环试件。为了避免试件开裂位置的随机性和开裂时间的不确定性，成型时在试件上表面预制一个深2 mm、宽1 mm的凹槽，籍此限定试件的开裂位置。外模拆除后，在凹槽部位的试件侧表面安装一个电阻应变片，并将应变片的数据采集仪与计算机相连接，裂缝产生时应变片的读数出现突变，从而可准确确定裂缝的开裂时间。

用于测定弯曲变形性能的砂浆试件尺寸为40 mm@40 mm@160 mm，用普通水泥胶砂试模成型，按水泥胶砂试件的标准养护方法进行养护。到达试验龄期后，在试件加载位置对应的下表面粘贴电阻应变片，然后在抗折试验机上进行测试，根据试件抗折强度的不同，控制荷载步进增量为0.25～0.50 MPa。

选择4个橡胶颗粒体积含量(橡胶颗粒体积与砂浆总体积之比V_R= 8%，16%，21.4%，32%，记为No. RS22～No. RS25)成型3天、7天和28天3个龄期的胶砂试件。基准试件(SR21)的配合比与测定水泥强度的胶砂试件的配合比相同，其余各组试件保持水泥浆数量不变，用一定体积的橡胶颗粒取代相同体积的砂，使之与基准试件相同。

按体积等量取代砂的原则，选择3个不同橡胶颗粒体积含量(V_R= 10.0%、12.5%、15.0%)成型橡胶混凝土试件，相应的橡胶颗粒用量为105.0、131.3、157.5 kg/m^3，橡胶混凝土配合比见表1。用于测定橡胶混凝土拉弯强度和弯曲韧性的试件尺寸为100 mm@100 mm@400 mm，每组4个试件。试验机为长春试验机厂生产的CSS244100型伺服程控试验机，最大量程为100 kN，自身具有可供进行四点弯曲试验专用的刚性支架。加载过程采用位

表1 橡胶混凝土配合比

Table 1 Mixing of rubberized concrete

No.	Cement/ (kg·m^{-3})	Water/ (kg·m^{-3})	Sand/ (kg·m^{-3})	Aggregate/ (kg·m^{-3})	Rubber volume fraction/%	Super plasticizer/%
RC21	392	196	729.0	1094.7	0.0	1
RC22	392	196	464.5	1094.7	10.0	1
RC23	392	196	397.2	1094.7	12.5	1
RC24	392	196	331.1	1094.7	15.0	1

移控制，加载速度为 0.01 mm/s。通过安装在试件底部中心位置的电阻应变片和顶部中心位置的位移计量测应变变化和挠度变化。

2　水泥净浆中掺入橡胶颗粒的开裂敏感性

不同橡胶颗粒体积含量的净浆开裂试验结果列于表 2，其中开裂时间是试件成型完毕至第一条裂缝出现的时间。

可以看出，在水泥净浆中掺入橡胶颗粒后，试件的开裂时间有所延迟。延迟时间随橡胶颗粒掺量的增加而增加。当橡胶颗粒体积含量小于 20%时，二者之间存在近乎正比的直线关系；超过 20%后，开裂时间的延迟效果显著增强。

从试验结果还可看出，基准试件($V_R = 0$)的开裂时间随着水灰比的减小而缩短，水灰比越小，试件越容易在早期开裂。这与工程中普遍存在的低水灰比高强混凝土比普通混凝土更容易开裂的情况吻合。掺有橡胶颗粒的试件也表现出相同的变化特点。

还可看出，无论水灰比是 0.3、0.4 还是 0.5，开裂时间与橡胶颗粒体积含量的关系曲线具有比较一致的变化规律，表明圆环抗裂试验具有较好的可信度，能比较客观地反映橡胶颗粒含量对水泥浆体抗裂性能的影响变化规律。

3　砂浆试件的弯曲应力应变特性

不同橡胶颗粒体积含量砂浆试件的抗折强度和极限应变列于表 3。

可以看出，用一定量的橡胶颗粒取代砂后，试件的抗折强度随着橡胶颗粒取代量的增加而减小。无论试验龄期是 3 天、7 天还是 28 天，其变化规律基本相同。橡胶颗粒体积含量每增加 8%，试件的抗折强度降低约 1.0 MPa，当橡胶颗粒体积含量超过 20%后，试件的抗折强度降低的幅度更大一些。这与其他研究者的结论是一致的[7]。

从表 3 还可看出，用一定量的橡胶颗粒取代砂后，试件的极限变形值随着橡胶颗粒取代量的增加而大幅度增加。以试验龄期 28 天为例，基准试件破坏时的极限应变为 3170 LE(1 LE= 1@10^{-6} mm/mm)；橡胶颗粒体积含量为 8.0%时为 771.5 LE，极限应变增加了 1.43 倍；橡胶颗粒体积含量为 16.0%时为 1351.5 LE，极限应变增加了 3.26 倍；橡胶颗粒体积含量为 21.4%时为 1791.0 LE，极限应变增加了 4.65 倍；而当橡胶颗粒体积含量为 32.0%时为 1974.0 LE，极限应变增加了 5.23 倍。

试验过程中发现，基准试件的破坏形式为脆性破坏，而掺有橡胶颗粒试件在加载过程中表现出明显的塑性变形，破坏形态也由脆性破坏变为延性破坏。基准试件在破坏前没有明显的变形，而橡胶颗粒体积含量大于 16%的试件在破坏前已呈/弓0形，刚进入破坏阶段时，橡胶颗粒像一排小弹簧那样分布在裂缝面上。表明掺入橡胶颗粒后，虽然强度有所降低，但其延性和韧性得到提高，适应变形的能

表 2　不同橡胶颗粒体积含量圆环试件的开裂时间

Table 2　Cracking time of ring specimen with different rubber volume fractions

Rubber volume fraction V_R/%		0	10	15	20	30	50
Cracking time/h	w/c* = 0.30	32.0	35.0	41.5	45.0	93.0	122.5
	w/c= 0.40	37.0	39.0	47.5	54.0	107.0	143.5
	w/c= 0.50	40.0	43.5	52.0	56.0	118.5	169.0

* : Water cement ratio

表 3　不同橡胶颗粒体积含量砂浆试件的抗折强度和极限应变值

Table 3　Flexural strength and ultimate strain of mortar specimen with different rubber volume fractions

No.	Rubber volume fraction V_R/%	Flexural strength/MPa			Ultimate strain/LE		
		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
RS21	0.0	6.25	6.75	6.75	287.3	291.7	317.0
RS22	8.0	5.25	5.50	5.75	609.3	731.0	771.5
RS23	16.0	4.25	4.75	5.00	1251.7	1313.0	1351.5
RS24	21.4	3.50	3.90	4.00	1551.5	1604.5	1791.0
RS25	32.0	2.50	2.50	2.75	1672.5	1855.0	1974.0

力明显加强。

4 混凝土试件的弯曲变形特性

不同龄期混凝土实测抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量及 28 天的拉压比、弯曲强度和极限拉应变列于表 4。试验过程中试件的应力2应变曲线和荷载2挠度变化曲线示于图 1。

从表 4 的数据可以看出，橡胶混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量均随着养护龄期的延长而增大，与普通混凝土的强度发展规律相同；强度随着橡胶颗粒掺量的增加而降低，但降低幅度有所不同，其中降低幅度最大的是抗压强度，其次是弹性模量，劈裂抗拉强度和弯曲强度降低幅度最小。以橡胶颗粒体积含量为 12.5% 的 RC23 为例，龄期为 28 天时抗压强度降低了 48%，弹性模量降低了 37%，劈裂抗拉强度降低了 31%，弯拉强度降低了 32%，这与其他研究者的结论是一致的[8]。

拉压比(劈裂抗拉强度与抗压强度的比值)是反应混凝土脆性的一个重要指标。拉压比越小，混凝土的脆性越大，韧性越小，适应变形的能力越差。可以看出，当橡胶颗粒体积含量为 10.0%、12.5% 和 15.0% 时，28 天的拉压比分别提高了 25%、40% 和 51%，3 天和 7 天的提高幅度也基本相同。同样，若以应力应变曲线下的面积作为韧性大小的衡量指标，可看出橡胶颗粒的掺入使混凝土的韧性大大增强。

极限拉应变和弯曲破坏特性是用来表征混凝土弯曲变形性能的两个重要指标。从表 4 数据可知，当橡胶颗粒掺量为 10.0%、12.5% 和 15.0% 时，试件破坏时的极限拉应变为 413、613 和 556 LE，分别为基准试件 164 LE 的 2.52 倍、3.74 倍和 3.39 倍，表明橡胶颗粒的掺入使极限变形能力显著提高。从图 1 还可看出，基准混凝土的弯曲应力2应变曲线和弯曲荷载2挠度变化曲线与橡胶混凝土存在明显差别。前者具有明显的脆性破坏特征，加载过程中两条曲线均近乎为直线，变形很小且破坏时

表 4 橡胶混凝土的力学性能测定结果

Table 4 Mechanical properties of rubberized concrete

No.	Compressive strength R_c/MPa			Splitting strength R_l/MPa			Elastic modulus E_c/GPa			R_l/R_c	Flexural strength/MPa	Ultimate strain/LE
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d			
RC21	20.3	26.4	41.1	1.8	2.6	3.2	25.2	34.5	37.2	0.077	4.7	164
RC22	12.4	15.7	24.1	1.4	2.0	2.3	18.2	24.6	27.0	0.096	3.6	413
RC23	10.5	12.9	21.4	1.4	1.9	2.2	16.2	21.7	23.6	0.108	3.2	613
RC24	9.3	11.9	18.0	1.3	1.8	2.1	14.5	18.3	19.6	0.116	3.0	556

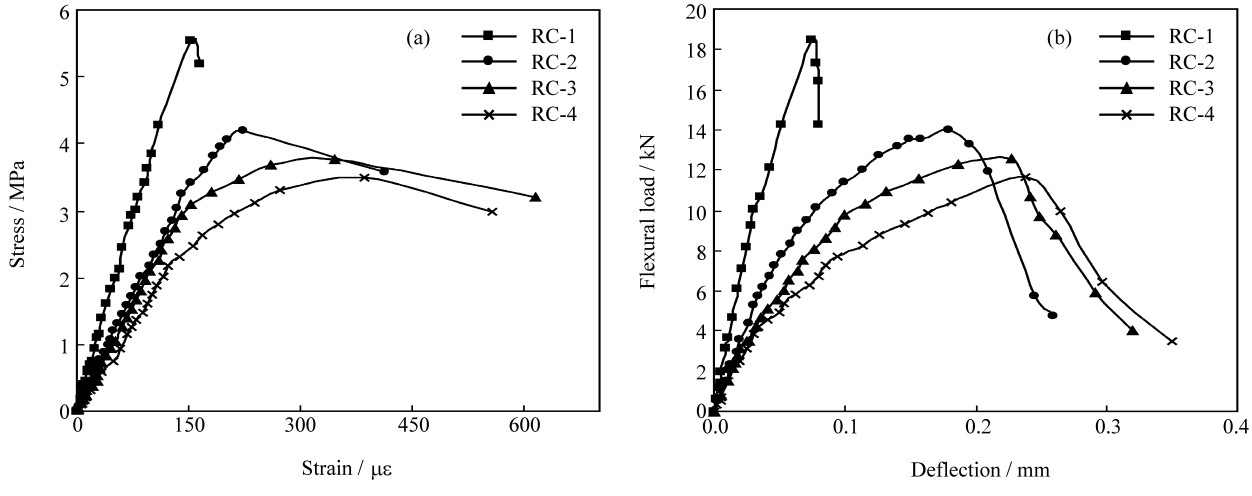

图 1 橡胶混凝土 28 天的弯曲应力2应变曲线(a)和弯曲荷载2挠度变化曲线(b)

Fig. 1 Stress2strain curves and flexural load2deflection curves of rubberized concrete at 28 d

突然断裂; 而后者则表现出明显的延性破坏特征, 加载过程中产生显著的塑性变形, 挠度较基准试件增大 2~ 3 倍, 到达破坏荷载后并不会立即断裂, 而是在经过较大的塑性变形后破坏。说明橡胶混凝土比普通水泥混凝土具有大得多的适应变形的能力。

对比 RC23 和 RC24 的试验结果可以发现, 橡胶混凝土的变形能力并不随着橡胶颗粒掺量的增加而增加, 而是存在一个合理值。超过该值后不仅力学强度降低得更多, 而且极限拉应变还会减小。在本研究中的几个橡胶颗粒体积含量中, 这个合理值在 121 5%左右。

5　机理分析

在水泥净浆、砂浆和混凝土中掺入橡胶颗粒, 之所以能推迟开裂时间、提高抗裂性能和适应变形能力, 与橡胶颗粒本身的物理特性密切相关。橡胶颗粒表面粗糙、不透水且富有弹性, 与水泥浆体的粘结形态要比聚丙烯等纤维要好, 能在试件内部形成分布较为均匀的可伸缩颗粒群, 显著降低试件的弹性模量, 提高变形能力。在试件因水化和干燥产生收缩变形时, 橡胶颗粒能够吸收部分收缩能量, 阻断渗水通道, 减小水分干燥蒸发速率, 从而使收缩应力减小, 开裂时间推迟[9]; 在试件弯曲过程中, 橡胶颗粒不仅像众多小弹簧那样承受部分弯曲荷载, 而且还会阻止微裂缝的扩展, 延缓新裂缝的出现, 从而提高变形能力, 并表现出显著的延性破坏特征[10]。

6　结　论

(1) 在水泥净浆中掺入废旧轮胎橡胶颗粒, 可延迟水泥净浆圆环试件的开裂时间, 有助于提高水泥基胶凝材料的抗裂性。延迟时间与橡胶颗粒的掺量有关, 橡胶颗粒含量越大, 延迟效果越显著。

(2) 在水泥砂浆和混凝土中用废旧轮胎橡胶颗粒取代部分砂, 会使抗压强度、劈裂抗拉强度、弯曲强度和弹性模量等力学性能降低; 但可使砂浆和混凝土的韧性和适应变形能力得到显著改善。破坏形式由脆性断裂变为延性破坏, 极限变形值得到大幅度提高。

(3) 本文中的研究只是对橡胶混凝土抗裂和变形性能的初步探讨, 尚有许多问题有待进一步的深入研究, 如橡胶混凝土的抗裂增韧机理, 抗冻抗渗性能和耐久性等。

参考文献:

[1] Siddique R, Naik T R. Properties of concrete containing scrap2 tire rubber: An overview [J]. Waste Management, 2004, 24: 563- 569.

[2] Segre N, Joekes I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 1421- 1425.

[3] Huang Baoshan, Li Guoqiang, Pang Su2Seng, et al. Investi2 gation into waste tire rubber2filled concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2004, 16(3): 187- 194.

[4] Fattuhi N I, Clark L A. Cement2based materials containing shredded scrap truck tire rubber [J]. Construction Building Materials, 1996, 10(4): 229- 236.

[5] 陈　波, 张亚梅, 陈胜霞, 张才华. 橡胶混凝土性能的初步研究 [J]. 混凝土, 2004(12): 37- 39.
Chen Bo, Zhang Yamei, Chen Shengxia, Zhang Caihua. Fun2 damental research of properties of rubberized concrete [J]. Concrete, 2004(12): 37- 39.

[6] 熊　杰, 郑　磊, 袁　勇. 废橡胶混凝土抗压强度试验研究 [J]. 混凝土, 2004(12): 40- 42.
Xiong Jie, Zheng Lei, Yuan Yong. Experimental study on compressive strength of rubberized concrete [J]. Concrete, 2004(12): 40- 42.

[7] Hernandez2Olivares F, Barluenga G, Bollati M, et al. Static and dynamic behavior of recycled tire rubber2filled concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 1587- 1596.

[8] Topcu I B, Avcular N. Analysis of rubberized concrete as a composite materials [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(8): 1135- 1139.

[9] Chung K H, Hong Y K. Introductory behavior of rubber con2 crete [J]. Journal of Applied Polymer, 1999, 72: 35- 40.

[10] Segre N, Joekes I. Rubber2mortar composite: Effect of com2 position on properties [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 3319- 3327.