

文章编号:1673-2049(2013)03-0096-05

橡胶混凝土的应力-应变曲线试验

袁 群¹,冯凌云¹,曹宏亮¹,史长城¹,张国岑²

(1. 河南省水利科学研究院 河南省水利工程安全技术重点实验室,河南 郑州 450003;

2. 河南省白龟山水库灌溉工程管理局,河南 平顶山 467031)

摘要:为研究橡胶颗粒粒径和掺量对橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变、割线模量和泊松比的影响变化规律,以C25强度的普通混凝土为基准,用60目胶粉、1~3 mm胶粒及3~6 mm胶粒等体积取代细骨料,配制成100 mm×100 mm×300 mm橡胶混凝土棱柱体试件,通过应变片测定橡胶混凝土在轴心压力作用下的应力-应变曲线。结果表明:与基准混凝土相比,橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变和割线模量均较小,且有随着橡胶掺量增大而减小的趋势;橡胶混凝土的泊松比前期比基准混凝土大,后期比基准混凝土小;橡胶颗粒粒径越小时这种差距越大,总体上表现出与橡胶颗粒粒径及掺量之间具有合理的相关关系。

关键词:橡胶混凝土;应力-应变曲线;泊松比;峰值应变;割线模量

中图分类号:TU528.41 **文献标志码:**A

Experiment on Stress-strain Curve of Rubber Concrete

YUAN Qun¹, FENG Ling-yun¹, CAO Hong-liang¹, SHI Chang-cheng¹,
ZHANG Guo-cen²

(1. Henan Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security Technology, Henan Provincial Water Conservancy Research Institute, Zhengzhou 450003, Henan, China; 2. Baiguishan Reservoir

Irrigation Project Administration Bureau of Henan Province,

Pingdingshan 467031, Henan, China)

Abstract: For the purpose of research on the influence of rubber particle size and rubber quantity on peak stress, peak strain, secant modulus and Poisson's ratio change rule of rubber concrete, a test was made to determine stress-strain curve with strain gauge of C25 ordinary concrete specimens of 100 mm×100 mm×300 mm, which were prepared with rubber powder of sixty mesh, rubber particles of 1-3 mm and 3-6 mm instead of fine aggregate. The results indicate that, compared with the reference concrete, peak stress, peak strain and secant modulus of rubber concrete are smaller and decreased with increment of rubber quantity, while the Poisson's ratio of rubber concrete is higher than the reference concrete in early period and lower than the reference concrete in later period. The finer the rubber particle size is, the greater difference is. Generally, the research results indicate that there is a reasonable correlation between rubber particle size and rubber quantity.

Key words: rubber concrete; stress-strain curve; Poisson's ratio; peak strain; secant modulus

收稿日期:2013-05-14

基金项目:河南省重点科技攻关项目(092102210074)

作者简介:袁 群(1966-),男,湖南洞口人,教授级高级工程师,工学博士,E-mail:yuanqun1@371.net.

0 引言

如何妥善处理日益增加的废旧轮胎橡胶已经成为全球环境与资源方面的一个热点问题,而橡胶水泥土和橡胶混凝土的开发和应用开辟了回收利用废旧轮胎橡胶的一个新思路。

研究表明,橡胶颗粒的掺入不但改变了水泥土或混凝土的组成成分,也使它们的材料性能发生了变化,这包括它们的本构关系即应力-应变关系的改变^[1-3]。王凤池等^[4]测定了纵横2个方向应力-应变曲线,研究了水泥掺量、橡胶粉掺量、橡胶粉粒径等因素对橡胶水泥土力学性能指标的影响变化规律,指出随着橡胶粉掺量的增加,橡胶水泥土模量呈降低趋势,其降低速率递减;橡胶水泥土的泊松比随着橡胶粉掺量的增加而增加。冯文贤等^[5]对高强橡胶混凝土进行了单轴受压试验,得到了不同掺量、不同橡胶粉粒径的高强橡胶混凝土的应力-应变曲线,根据曲线特点提出了包含上升段本构参数 A 和下降段本构参数 α 的高强橡胶混凝土单轴受压本构方程,研究发现, A 和 α 随着胶粉掺量的增加而减小,橡胶粉的粒径对本构参数 A 和 α 的影响不明显。王婧一等^[6]对普通混凝土和橡胶混凝土进行了单轴受压试验研究,得到了混凝土的单轴受压应力-应变全曲线,结果表明,橡胶混凝土单轴受压应变峰值分别为普通混凝土的1.74倍和1.92倍。

橡胶颗粒从形态上可细分为粒状、条状、纤维状和粉状等多种形式,由于掺入混凝土橡胶颗粒形态的变化也会引起混凝土性能发生变化,因此目前针对橡胶混凝土的性能包括应力-应变关系的研究还需进一步深入。本文中笔者选用粒状和粉状橡胶颗粒掺入混凝土,测定橡胶混凝土在轴心压力作用下的应力-应变曲线,研究橡胶颗粒粒径和掺量对橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变、割线模量和泊松比的影响变化规律。

1 试验设计

1.1 试验方法

试验采用尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的混凝土棱柱体试件,试验时在试件2个相对侧面各粘贴1个长 10 cm 的应变片,在另外2个相对侧面垂直粘贴2个长 5 cm 的应变片,应力、应变数据通过 YJ-33 静态电阻应变仪采集,加载速度为 $0.1\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,加载速度通过 WAW-1000 电液伺服试验机控制,应力每增加 1 MPa 采集一次数据

(图1)。为避免形成应力集中,减少端部受力不均匀对试验结果产生的影响,试验正式加载前均进行预加载,预加荷载参照立方体试件抗压强度试验结果,取预估轴压峰值荷载的 $30\% \sim 40\%$,每个试件重复加载3次。由于试验方法的限制,本文中仅对上升段的应力-应变关系进行分析研究。试验每组6个试件,从试验结果中选取较好的3条应力-应变曲线,在相同应变处取应力的平均值,得到每组试件的平均应力-应变曲线,下面将分别分析3种粒径橡胶混凝土的应力-应变曲线规律。



图1 试验加载装置

Fig. 1 Test Loading Apparatus

对橡胶混凝土的割线模量进行分析时,取橡胶混凝土应力-应变曲线上上升段 0.4 倍极限应力时的割线模量,其计算公式为

$$E_c = 0.4 f_c / \epsilon \quad (1)$$

式中: E_c 为割线模量; f_c 为极限应力; ϵ 为 0.4 倍极限应力对应的应变。

1.2 试验材料

水泥选用河南省三星水泥工业有限公司生产的复合硅酸盐水泥 P. C 32.5, 物理力学性能指标见表1。粗骨料为石灰岩碎石, 二级配, 石子粒径分为 $5 \sim 10\text{ mm}$, $10 \sim 20\text{ mm}$ 两种, 两者质量掺量之比为 $4 : 6$, 表观密度为 $2\,732\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 级配合格。细骨料为河砂, 细度模数 2.70 , 最大粒径 5 mm , 连续级配, 表观密度为 $2\,703\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 性能良好。橡胶颗粒选用河南武陟某胶粉厂生产的 60 目胶粉(对应筛网孔径为 $250\text{ }\mu\text{m}$)、 $1 \sim 3\text{ mm}$ 胶粒及 $3 \sim 6\text{ mm}$ 胶粒, 密度为 $1\,119\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

对于基准混凝土, 水泥、水、砂、石子的配合比为 $380 : 215 : 650 : 1\,155$, 水灰比为 0.57 , 砂率为 0.36 , 混凝土密度为 $2\,400\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 28 d 强度为 27.2 MPa 。用橡胶颗粒等体积取代砂(混凝土配合比除了砂和橡胶掺量不同外, 其他成分均相同, 这样保证了相同水灰比下骨料的总体积不变)制备混凝土试件, 取橡胶掺量(质量分数, 下同)分别为 5% ,

表1 水泥的物理力学性能指标

Tab. 1 Physical and Mechanical Performance Indexes of Cement

水泥种类	细度/%	标准稠度用水量/mL	三氧化硫质量分数/%	氧化镁质量分数/%	氯离子质量分数/%	凝结时间/min		3 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	3 d 抗拉强度/MPa	28 d 抗拉强度/MPa
						初凝	终凝				
P. C32.5	0.2	134	2.95	1.63	0.048	255	350	16.9	37.9	3.5	7.2

10%, 15%, 20%, 30%, 则对应的橡胶用量分别为 13.5, 26.9, 40.4, 53.8, 80.7 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。不掺入橡胶颗粒的混凝土用 JZ 表示, 掺入 3~6 mm 胶粒的混凝土试件用 RCD 表示, 掺入 1~3 mm 胶粒的混凝土试件用 RCZ 表示, 掺入 60 目胶粉的混凝土试件用 RCX 表示。

2 试验结果分析

2.1 橡胶混凝土应力-应变曲线的基本特征

图 2~4 分别为掺入 3~6 mm 胶粒、1~3 mm 胶粒、60 目胶粉的混凝土上升段应力-应变关系。由图 2~4 可以看出, 3 种橡胶混凝土应力-应变关系上升段与基准混凝土类似, 应变上升段经历了弹性阶段、弹塑性阶段、内部裂缝形成阶段^[7]。与基准混凝土相比, 橡胶混凝土的弹性极限和内部裂缝开展点的应力、应变较小, 橡胶混凝土的峰值应力和峰值应变也较小(只有 RCD5, RCX10, RCX15 略大于基准混凝土), 随着应变的增加, 应力增长缓慢。

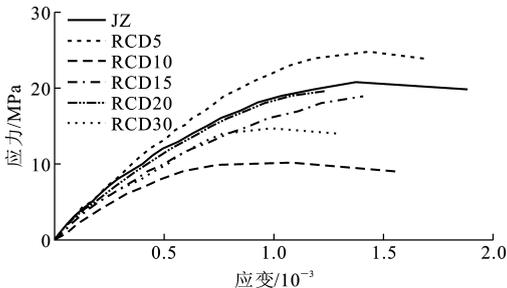


图2 RCD 橡胶混凝土上升段应力-应变关系

Fig. 2 Rising Segment Stress-strain Relations of RCD Rubber Concrete

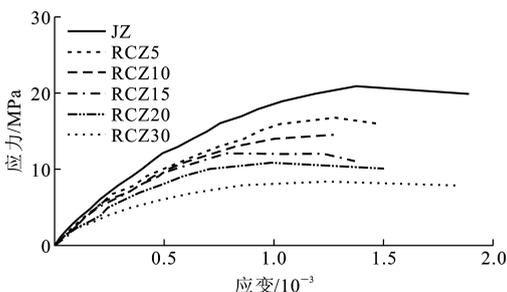


图3 RCZ 橡胶混凝土上升段应力-应变关系

Fig. 3 Rising Segment Stress-strain Relations of RCZ Rubber Concrete

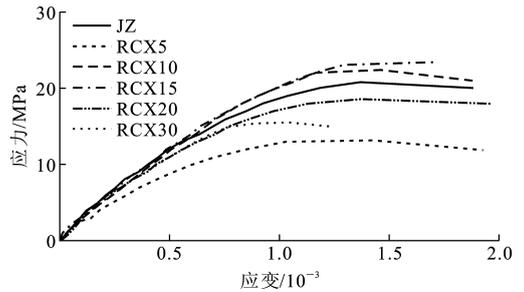


图4 RCX 橡胶混凝土上升段应力-应变关系

Fig. 4 Rising Segment Stress-strain Relations of RCX Rubber Concrete

2.2 峰值应力与峰值应变

图 5, 6 分别为橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变与橡胶掺量的关系。图 5 中 3 种橡胶混凝土的峰值应力均是随着橡胶掺量的增大而减小, 其中掺入 1~3 mm 胶粒的橡胶混凝土的峰值应力随着橡胶掺量的增加基本呈线性降低, 掺量 30% 时的峰值应力只有 10 MPa。橡胶颗粒本身强度小, 与水泥土的结合也较弱, 在混凝土中成为薄弱点, 从而降低了混凝土的峰值应力。而掺入 3~6 mm 胶粒和 60 目胶粉的橡胶混凝土的峰值应力离散性较大, 说明较大橡胶颗粒和橡胶粉在混凝土中不易均匀分布, 致使混凝土的不均匀性增大, 橡胶掺量相同时, 3 种橡胶混凝土相比, 则是掺入 3~6 mm 胶粒和 60 目胶粉的橡胶混凝土的峰值应力大致相当, 两者均大于 1~3 mm 胶粒的橡胶混凝土。图 6 中, 掺入 1~3 mm 胶粒的橡胶混凝土的峰值应变随着橡胶掺量的增加而减小, 掺入 3~6 mm 胶粒和 60 目胶粉的橡胶混凝土的峰值应变在掺量 0%~15% 时增大了, 在掺量 15%~30% 时减小了, 峰值应变的这种阶段性变化也说明了较大橡胶颗粒和橡胶粉在混凝土中分布的不均匀性。

2.3 割线模量

图 7 为橡胶混凝土割线模量的变化规律。掺入 1~3 mm 胶粒的橡胶混凝土的割线模量基本是随着橡胶掺量的增加而减小, 在掺量 5%~15% 时混凝土的割线模量降低幅度在 10% 左右, 当掺量大于 15% 时, 割线模量开始加速下降, 掺量 30% 时橡胶混凝土的割线模量降至基准混凝土的 63%。掺入 3~6 mm 胶粒和 60 目胶粉的橡胶混凝土的割线模

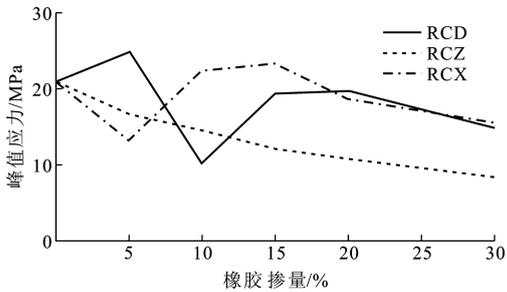


图 5 橡胶混凝土的峰值应力

Fig. 5 Peak Stresses of Rubber Concrete

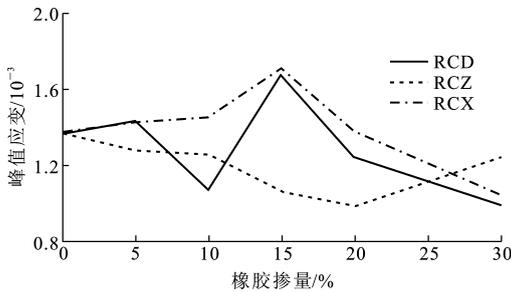


图 6 橡胶混凝土的峰值应变

Fig. 6 Peak Strains of Rubber Concrete

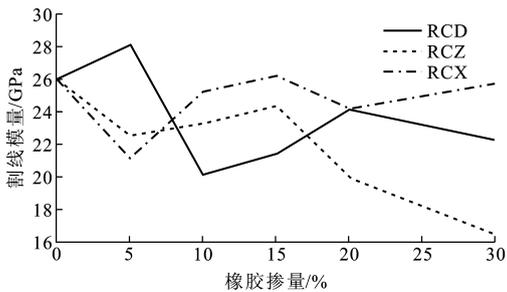


图 7 橡胶混凝土的割线模量

Fig. 7 Secant Moduli of Rubber Concrete

量随着橡胶掺量的增加而下降,只有个别掺量的橡胶混凝土的割线模量略大于基准混凝土,割线模量的离散主要是由 3~6 mm 胶粒和 60 目胶粉在混凝土中的不均匀分布引起的。

2.4 泊松比

如图 8~10 所示,橡胶混凝土的泊松比 μ 随着应力 σ 的增加而增大。基准混凝土应力 σ 在 $0 \sim 0.4f_c$ 变化时泊松比的增长幅度缓慢,在 $0.4f_c \sim 1.0f_c$ 变化时泊松比增幅较大。当混凝土应力较小时 ($\sigma \leq 0.4f_c$),与基准混凝土类似,橡胶混凝土的泊松比基本不变,接近常值,各种混凝土泊松比的范围在 $0.15 \sim 0.30$ 之间,泊松比有随着橡胶取代量增大而增加的趋势。图 8 中,在应力 $\sigma < 0.3f_c$ 时,RCD 橡胶混凝土的泊松比比基准混凝土泊松比大,在应力 $\sigma > 0.7f_c$ 时则相反。图 9 中,在应力 $\sigma < 0.43f_c$

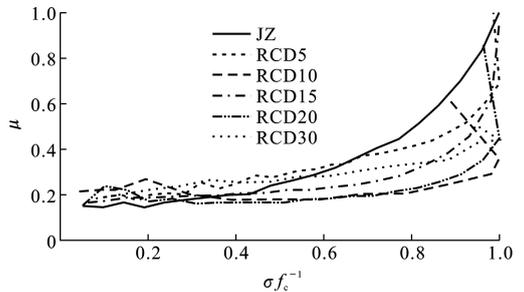


图 8 RCD 橡胶混凝土的泊松比

Fig. 8 Poisson's Ratios of RCD Rubber Concrete

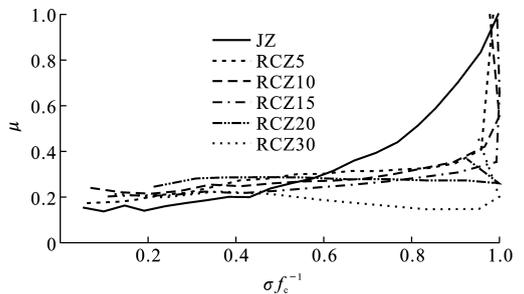


图 9 RCZ 橡胶混凝土的泊松比

Fig. 9 Poisson's Ratios of RCZ Rubber Concrete

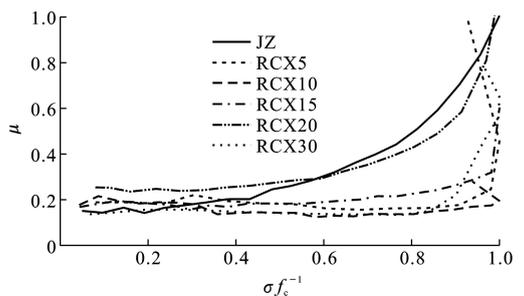


图 10 RCX 橡胶混凝土的泊松比

Fig. 10 Poisson's Ratios of RCX Rubber Concrete

时,RCZ 橡胶混凝土的泊松比比基准混凝土泊松比大,而在应力 $\sigma > 0.62f_c$ 时则相反;图 10 中,在应力 $\sigma < 0.3f_c$ 时,RCX 橡胶混凝土的泊松比比基准混凝土泊松比大,而在应力 $\sigma > 0.6f_c$ 时则相反。这表明橡胶混凝土在变形前期弹塑性较基准混凝土好,后期能量吸收多,裂缝开裂小。在应力 $\sigma < 0.3f_c$ 时,RCD 橡胶混凝土泊松比由大到小依次为 RCD10, RCD20, RCD30, RCD5, RCD15;而在应力 $\sigma > 0.7f_c$ 时,泊松比由大到小依次为 RCD5, RCD30, RCD15, RCD20, RCD10, 顺序基本相反。同样的规律在 RCZ 橡胶混凝土、RCX 橡胶混凝土中也有体现。橡胶混凝土与基准混凝土的泊松比之差的最大值基本都出现在 $\sigma = 0.9f_c$ 时,且 RCD 橡胶混凝土与基准混凝土的泊松比之差最大只有 0.2,而 RCZ 橡胶混凝土达到了 0.4,RCX 橡胶混凝土则达到了 0.6。

3 结 语

(1)与基准混凝土相比,橡胶混凝土的弹性极限、内部裂缝开展点的应力、应变、峰值应力和峰值应变均较小。

(2)橡胶混凝土上升段 0.4 倍极限应力时的割线模量基本上都小于基准混凝土,且有随着橡胶取代量增大而减小的趋势,1~3 mm 胶粒的橡胶混凝土这一规律较为明显。

(3)橡胶混凝土的泊松比前期比基准混凝土大,而后期比基准混凝土小,且橡胶颗粒粒径越小时这种差距越大。RCD 橡胶混凝土与基准混凝土的泊松比之差最大只有 0.2,而 RCZ 橡胶混凝土达到了 0.4,RCX 橡胶混凝土则达到了 0.6,差距依次增大。

(4)试验结果表明,橡胶混凝土的峰值应力、峰值应变、割线模量和泊松比总体上表现出与橡胶粒径及掺量具有合理的相关关系,但也存在着明显的不规律性,反映出橡胶混凝土材料性能本身具有较大的随机不稳定性。

参考文献:

References:

- [1] 刘 锋,潘东平,李丽娟,等. 橡胶混凝土应力和强度的细观数值分析[J]. 建筑材料学报,2008,11(2):144-151.
LIU Feng, PAN Dong-ping, LI Li-juan, et al. Rubber Numerical Simulation on Macro-level of Stress and Strength in Crumb Rubber Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(2): 144-151.
- [2] 焦楚杰,张传镁,张文华. 橡胶混凝土研究进展[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(2):138-145.
JIAO Chu-jie, ZHANG Chuan-mei, ZHANG Wen-hua.

- An Overview of the Study on Rubcrete[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(2): 138-145.
- [3] 田 薇,郑 磊,袁 勇. 橡胶混凝土脆性的试验研究[J]. 混凝土,2007(2):37-40.
TIAN Wei, ZHENG Lei, YUAN Yong. Experiment Study on Brittleness of Rubberized Concrete[J]. Concrete, 2007(2): 37-40.
- [4] 王凤池,燕 晓,黄志强,等. 橡胶水泥土模量与泊松比的变化规律[J]. 沈阳工业大学学报,2010,32(4):499-452.
WANG Feng-chi, YAN Xiao, HUANG Zhi-qiang, et al. The Change Rule in Modulus and Poisson's Ratio of Rubberized Cement-soil[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(4): 499-452.
- [5] 冯文贤,魏宜达,李丽娟,等. 高强橡胶混凝土单轴受压本构关系的试验研究[J]. 新型建筑材料,2010(2):12-15.
FENG Wen-xian, WEI Yi-da, LI Li-juan, et al. Experimental Study on Constitutive Relation of High Strength Crumb Rubber Concrete to Uniaxial Compression[J]. New Building Materials, 2010(2): 12-15.
- [6] 王婧一,王立燕,张亚梅. 弹性橡胶混凝土压、弯变形性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2008(2):6-10.
WANG Jing-yi, WANG Li-yan, ZHANG Ya-mei. Experimental Study on Deformation Characteristic of Elastic Rubberized Under Compressive and Flexural Loading[J]. China Concrete and Cement Products, 2008(2): 6-10.
- [7] 过镇海. 混凝土的强度和变形试验基础和本构关系[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
GUO Zhen-hai. Concrete's Strength and Deformation Test Base and the Constitutive Relation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.