

[文章编号] 1003-4684(2023)02-0061-05

# 橡胶混凝土力学性能及疲劳性能研究

颜 岩<sup>1</sup>, 孔 昱<sup>1</sup>, 王迎斌<sup>1</sup>, 赵 航<sup>2</sup>, 白应华<sup>1</sup>

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2 空军后勤部工程代建管理办公室, 四川 新津 611430)

[摘 要] 为研究 40% 掺量的橡胶混凝土的抗压强度和弹性模量性能, 及低温环境对其影响规律, 进行了抗压和弹性模量试验; 对不同应力水平下的橡胶混凝土开展抗压疲劳试验, 通过建立疲劳方程来描述不同混凝土的抗压疲劳特性。结果表明, 40% 体积掺量的橡胶混凝土抗压强度降低 34.64%, 弹性模量降低 28.84%。-40℃ 环境下橡胶混凝土抗压强度提高 3.53%, 弹性模量提高 16.28%。橡胶混凝土在应力水平 0.75、0.80、0.85 时疲劳寿命次数分别提高 83.39%、73.71%、31.11%。选用单对数疲劳方程来描述混凝土疲劳特性, 得到不同混凝土回归方程的相关系数都接近于 1, 可以较好地反应混凝土的疲劳特性, 为橡胶混凝土在不同应力水平作用下疲劳寿命预测提供参考。

[关键词] 橡胶混凝土; 低温; 弹性模量; 抗压疲劳

[中图分类号] TU528.2 [文献标识码] A

将橡胶颗粒或者橡胶粉来替代混凝土中的不同粒径的集料, 得到的橡胶混凝土, 可以达到改善混凝土脆性, 提高水泥的韧性, 增强混凝土变形能力的效果, 橡胶应用在混凝土中是目前解决日益增多的废旧橡胶产物的重要方式之一<sup>[1]</sup>。应用在人行道、路面, 桥梁伸缩缝等露天工程结构领域中, 需要在保证橡胶混凝土基本力学性能的基础上, 考虑在受到来自外界极端温度环境变化和不断重复的长期荷载作用后橡胶混凝土性能的改变, 由此不同学者对橡胶混凝土的基本力学性能及疲劳性能进行了研究。王婷雅<sup>[2]</sup>对 1~3 mm、3~6 mm 和 0~0.85 mm 的橡胶混凝土在 0℃、-10℃、-20℃ 下的抗压强度进行试验, 结合橡胶混凝土试件的微观结构进行深入研究, 探究其破坏机理, 发现 3~6 mm 的橡胶粒径在 -20℃ 下强度提高最多。薛刚<sup>[3]</sup>对 -30℃ 环境下 5%~20% 橡胶掺量的橡胶混凝土应对不同应力速率时的动态弹性模量和轴心抗压性能变化开展了研究, 结果发现, 橡胶粒径减小时峰值应变提高, 动态抗压强度降低。Chen<sup>[4]</sup>和 Ganesan<sup>[5]</sup>等都使用自密实混凝土, 研究了橡胶混凝土的疲劳特性, 总结出自己的损伤演化模型。Liu<sup>[6-7]</sup>对掺量在 0~30% 以内的再生橡胶混凝土试块进行了等幅的抗折疲劳试验, 阐述了试块疲劳内部发展的三个阶段的特征。Zhang<sup>[8]</sup>和王立燕<sup>[9]</sup>通过声发射设备对混凝土试块

内部形态特征进行了分析研究, 刘妙燕<sup>[10]</sup>也使用声发射进行三点弯曲疲劳试验, 探究橡胶的掺入对混凝土断裂特性的作用机理。付建<sup>[11]</sup>使用 40 目橡胶粉替代混凝土中的粗骨料, 对橡胶混凝土三点弯曲疲劳特性进行试验研究。

不少学者对橡胶混凝土力学性能和疲劳特性进行了探索, 目前多数研究是在 0~30% 橡胶掺量范围内进行的, 本文通过将橡胶替代 40% 体积分数的细骨料来制备橡胶混凝土, 探究掺入橡胶后橡胶混凝土抗压强度、弹性模量的变化, 及 -40℃ 对其抗压、弹性模量性能的影响, 研究橡胶混凝土在 0.75、0.80、0.85 的不同的应力水平下抗压疲劳寿命, 结合疲劳损伤理论进行疲劳寿命方程的构建和对比分析<sup>[12]</sup>, 为预测橡胶混凝土的疲劳寿命提供理论参考。

## 1 试验计划

### 1.1 原材料及配合比

本试验使用华新堡垒武汉水泥厂生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥; 水为普通自来水; 使用粗、细天然集料均产自武汉本地, 细集料 1 为普通河砂, 其细度为 2.58, 砂的含泥量 2.67%, 密度 1.50 g/cm<sup>3</sup>; 粗集料 1 为 5~20 mm 的小石, 粗集料 2 为 20~40 mm 的大石, 连续级配; 使用橡胶为四川都江堰翼

[收稿日期] 2021-11-23

[基金项目] 国家自然科学基金青年基金项目(52008158)

[第一作者] 颜 岩(1981-), 男, 湖北洪湖人, 湖北工业大学讲师, 研究方向为新型建筑材料

[通信作者] 白应华(1975-), 男, 湖北应城人, 湖北工业大学副教授, 研究方向为新型混凝土材料和工程结构

禾橡胶制品经营部 TRFA-1 型橡胶粉,密度 0.65 g/cm<sup>3</sup>,平均粒径 0.30 mm;外加剂为高效聚羧酸减水剂。

混凝土试块的配合比设计见表 1,RC 表示橡胶混凝土,橡胶取代细集料的体积分数为 40%,KB 为普通混凝土空白对照组。

表 1 混凝土配合比						kg/m <sup>3</sup>	
试验组	水泥	细集料	粗集料 1	粗集料 2	橡胶粉	水	减水剂
RC-40	405	445	807	587	110	142	13
KB	405	621	807	587	—	142	11

### 1.2 试件制作

1) 抗压、弹性模量试验试件  
分别制作 RC-40、KB 两种试件,养护 28 d。试件设计见表 2。

表 2 抗压、弹性模量试验试件设计			
试验类型	试件尺寸	组数	个数/组
RC-40	100 mm×100 mm×100mm	2	3
	100 mm×100 mm×300mm	2	3
KB	100 mm×100 mm×100mm	2	3
	100 mm×100 mm×300mm	2	3

2) 抗压疲劳试验试件  
分别制作 RC-40、KB 两种试件,养护 90 d。试件设计见表 3。

表 3 抗压疲劳试验试件设计			
试件类型	试件尺寸	组数	个数/组
RC-40	100 mm×100 mm×300 mm	3	3
KB	100 mm×100 mm×300 mm	3	3

### 1.3 试验方法

1) 抗压、弹性模量试验:立方体抗压试验依据 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行。弹性模量试验依据 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,所用弹性模量试验装置使用型号为 YA-300 电液式压力试验机;使用位移计,精确度为 0.001 mm,试验装置如图 1 所示。



图 1 弹性模量试验装置

2) 低温试验:使用液氮在密闭低温实验箱内进行降温,使用 PT-100 低温电偶监测仪监测温度变化,TDS-530 日本产静态数据采集仪采集温度。将

养护 28 d 的试件放入实验箱中后,液氮降温至 -40℃后保持 1 h,回温至室温后取出进行抗压和弹性模量试验。

3) 抗压疲劳试验:试验根据规范 GB/T50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》开展,在电液伺服疲劳试验机上进行,加载频率为 10 Hz,选择的应力水平分别为 0.75、0.80、0.85。

## 2 试验结果分析

### 2.1 橡胶对混凝土抗压强度、弹性模量的影响

RC-40 混凝土、KB 混凝土 28 d 立方体抗压强度和弹性模量试验结果分别见表 4、表 5,混凝土抗压强度、弹性模量试验结果见图 2。

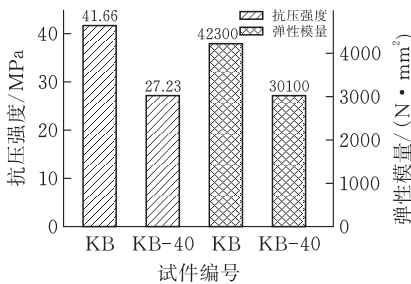


图 2 混凝土抗压强度、弹性模量试验结果

表 4 混凝土立方体抗压强度试验结果				
试件编号	轴心抗压强度/MPa			均值/MPa
	1	2	3	
KB	41.18	43.67	40.12	41.66
RC-40	26.15	30.96	24.67	27.23

从表 4 中可知,RC-40 混凝土的立方体抗压强度下降 34.64%。橡胶混凝土抗压强度的降低是由于橡胶本身的强度较小,将 40%体积掺量的橡胶掺入混凝土试块中,混凝土试块内的受力承载面减少,直接导致试件抗压能力的下降。橡胶表面的硬脂酸钠等物质的疏水性产生引气效果,使橡胶和水泥基材料之间出现相容性差的问题,两者无法产生足够强度的粘结,界面之间会出现更多微缝隙。当橡胶混凝土试件受到荷载时,上述两个原因相互影响,由于承载面减少和集料间的应力集中作用,橡胶和水泥基材料间的微缝隙会进一步的发展和扩张,直到贯穿整个试件,致使试块的整体强度出现大幅度下降,导致试件加速破坏。

表 5 混凝土弹性模量试验结果				
试件编号	弹性模量/(N·mm <sup>2</sup> )			均值/ (N·mm <sup>2</sup> )
	1	2	3	
KB	4.22×10 <sup>4</sup>	4.16×10 <sup>4</sup>	4.32×10 <sup>4</sup>	4.23×10 <sup>4</sup>
RC-40	2.99×10 <sup>4</sup>	3.01×10 <sup>4</sup>	3.03×10 <sup>4</sup>	3.01×10 <sup>4</sup>

由表 5 可知,RC-40 混凝土 28 d 弹性模量降低 28.84%。由于橡胶是一种低弹性模量的高分子有

矿物,弹性模量远小于水泥基中各种材料的弹性模量,在受到荷载时橡胶会吸收一部分能量,橡胶的使用可以改进混凝土的变形协调能力<sup>[13-14]</sup>。相比于 KB 混凝土,RC-40 混凝土内部的应力发展速度更加缓慢<sup>[8]</sup>,橡胶的掺入会在橡胶混凝土内部产生应力重新分布的效果,受到荷载后橡胶混凝土试块内部应力松弛,导致混凝土试件的弹性模量出现大幅度降低,试验试件破坏形态如图 3、4 所示。



图 3 KB-40 混凝土试件破坏形态



图 4 KB 混凝土试件破坏形态

2.2 低温对橡胶混凝土抗压强度、弹性模量的影响

RC-40 混凝土、KB 混凝土在  $-40^{\circ}\text{C}$  低温后抗压强度、弹性模量试验结果分别见表 6、表 7,低温后混凝土抗压强度、弹性模量试验结果见图 5。

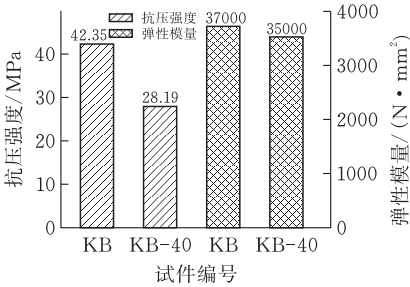


图 5 低温后混凝土抗压强度、弹性模量试验结果

表 6 低温后混凝土立方体抗压强度试验结果

试件编号	轴心抗压强度/MPa			均值/MPa
	1	2	3	
KB	42.49	43.35	41.22	42.35
RC-40	28.69	31.50	24.67	28.19

由表 6 可知,RC-40 混凝土立方体低温后抗压强度提高 3.53%,KB 混凝土低温后立方体抗压强度提高 1.66%。在  $-40^{\circ}\text{C}$  低温下,混凝土内部存在的自由水会发生凝结,结晶成为更坚固的固体状态<sup>[2]</sup>,固态的冰硬度上升,试件的抗压强度会出现小

幅度上升。在橡胶混凝土中,橡胶粉的比表面积较大,其表面由于疏水性附着的水膜也更多,在低温下,橡胶也会随着其表面的水膜状态的改变提高了硬度,成为基体内受力承载的一部分,试件内部的应力分布情况开始改变,橡胶混凝土的抗压强度呈现上升趋势。

表 7 低温后混凝土弹性模量试验结果

试件编号	弹性模量/( $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ )			均值/ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ )
	1	2	3	
KB	$3.72 \times 10^4$	$3.66 \times 10^4$	$3.72 \times 10^4$	$3.70 \times 10^4$
RC-40	$3.50 \times 10^4$	$3.26 \times 10^4$	$3.74 \times 10^4$	$3.50 \times 10^4$

由表 7 可知在,RC-40 混凝土在低温后弹性模量提高 16.28%;KB 混凝土低温后弹性模量则降低 12.53%。在  $-40^{\circ}\text{C}$  的低温环境时,混凝土内孔隙中的自由水凝结成冰晶,水形态体积的变化对孔隙的内壁产生冻胀力<sup>[2]</sup>,破坏混凝土内部存在的孔隙结构,毛细孔隙之间出现联结发展成微裂缝,导致混凝土内部出现更多缺陷,KB 混凝土的弹性模量出现下降。在 RC-40 混凝土中,橡胶的掺入可以吸收一部分冰晶带来的冻胀应力,但橡胶粉的小体积颗粒更容易受到温度变化带来的影响,大量的橡胶粉的弹性变形能力受到低温影响出现收缩,在恢复室温后,应对相同荷载环境时橡胶粉会表现得更加迟钝,橡胶粉的性能经过改变后其无法在试件内微裂缝拓展和延伸时及时吸收荷载能量<sup>[3]</sup>,从而导致在低温环境后橡胶混凝土的弹性模量升高,但其弹性模量仍低于 KB 混凝土。

2.3 橡胶粉对混凝土疲劳寿命的影响

不同应力水平下 RC-40 混凝土抗压疲劳寿命结果见表 8,KB 混凝土抗压疲劳寿命结果见表 9。

表 8 RC-40 橡胶混凝土疲劳寿命结果

0.75		0.80		0.85	
编号	次数	编号	次数	编号	次数
RC-40-1	109859	RC-40-4	28941	RC-40-7	3154
RC-40-2	98967	RC-40-5	41235	RC-40-8	1125
RC-40-3	112876	RC-40-6	21567	RC-40-9	2156
平均值	107234	平均值	30581	平均值	2145

表 9 KB 普通混凝土疲劳寿命结果

0.75		0.80		0.85	
编号	次数	编号	次数	编号	次数
KB-1	88658	KB-4	31254	KB-7	1597
KB-2	76524	KB-5	11681	KB-8	2364
KB-3	10239	KB-6	9879	KB-9	946
平均值	58474	平均值	17605	平均值	1636

由表 8~9 可知,随着试验应力水平的不断增加,所有试块的抗压疲劳寿命次数都出现大幅度降低。在应力水平 0.75、0.80、0.85 下,RC-40 混凝土



试块的抗压疲劳寿命次数均多于 KB 混凝土。RC-40 混凝土试块在应力水平为 0.80 和 0.85 时的疲劳寿命次数比 0.75 时分别降低 71.48% 和 98.00%；KB 混凝土试块在应力水平为 0.80 和 0.85 时的疲劳寿命次数比 0.75 时分别降低 69.89% 和 97.20%。相比普通混凝土,0.75、0.80、0.85 水平应力下 RC-40 混凝土的疲劳寿命次数分别提高了 83.39%、73.71%、31.11%。

在普通混凝土中掺入了强度更低、弹性模量更低的橡胶,导致试块内部的缺陷增多,橡胶混凝土强度下降,橡胶混凝土疲劳寿命次数却是增加的。由于橡胶本身的低弹性模量特性,橡胶混凝土对应力水平的改变更加敏感,疲劳寿命次数浮动范围更大<sup>[11]</sup>。在整个疲劳损伤的过程中,橡胶吸收能量后抵消了部分外加荷载对试块的损伤,使得橡胶混凝土试块拥有更好的抗变形能力,延长了 RC-40 混凝土在长期外加荷载下的抗压疲劳寿命。

2.4 S-N 曲线

疲劳方程是描述疲劳性能最直观的方法之一,不同混凝土在不同应力水平条件下的疲劳特征需要选择适当的方式来描述。通常选用的 S-N 曲线需要的样本数量较少,可以较为精确的描述疲劳特性。疲劳方程由于使用的条件不同,也存在单对数、双对数两种形式,在 N 趋于无限大时使用双对数进行疲劳寿命的描述,本试验中疲劳破坏的次数相对较小,更适合使用单对数方程来进行寿命的描述,所以采用  $S = b\lg N + \alpha$  描述橡胶混凝土的抗压疲劳寿命<sup>[15-16]</sup>。试验抗压疲劳数据分析结果见表 10,根据抗压疲劳试验结果得到的不同试件压坏时的疲劳寿命次数,结合不同数据对应的应力水平,采用线性回归分析方法,对试验所得数据进行拟合,得到的抗压疲劳寿命曲线见图 6~7。

表 10 疲劳寿命分析

应力水平	试件	疲劳寿命 N/次	lgN
0.75	RC-40	107234	5.0303
	KB	58474	4.7670
0.80	RC-40	30581	4.4855
	KB	17605	4.2456
0.85	RC-40	2145	3.3314
	KB	1636	3.2138

分别以 lgN 为横坐标,应力水平 S 为纵坐标,做出相应试块的疲劳方程函数图像,结果如图 6、图 7 所示。

从图 6~7 可知, S 和 lgN 表现出较好的线性关系,验证了 RC-40 混凝土和普通混凝土的疲劳寿命的确服从单对数疲劳方程。结合整理试验数据,

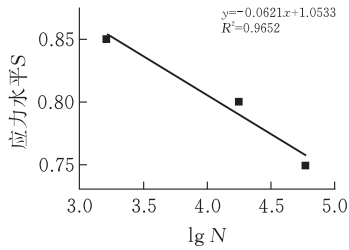


图 6 KB 混凝土疲劳寿命 S-N 图

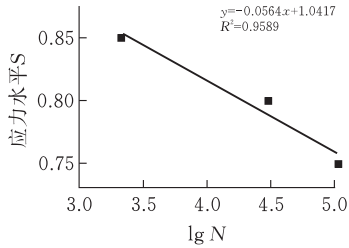


图 7 RC-40 混凝土疲劳寿命 S-N 图

并将相关系数列出,进行线性回归分析,最终得出不同混凝土抗压疲劳方程分别为:

RC-40:  $S = -0.0564\lg N + 1.0417$

KB:  $S = -0.0621\lg N + 1.0533$

由图 6~7 可知,RC-40 混凝土和 KB 混凝土试块的回归方程的相关系数分别为 0.9589 和 0.9652,都接近于 1,表明本试验中使用的单对数疲劳方程可以较好地拟合不同试块的疲劳寿命,反应不同混凝土的疲劳特性,可应用到橡胶混凝土疲劳寿命的预测中。

3 结论

本研究对掺入 40% 橡胶粉的混凝土进行了抗压强度、弹性模量试验,探究在低温-40℃ 环境对橡胶混凝土抗压强度、弹性模量的影响,并在不同应力水平 0.75、0.80、0.85 下分别进行的抗压疲劳试验,得出如下结论:

1)在掺入 40% 体积掺量的橡胶粉之后,RC-40 混凝土的抗压强度下降 34.64%,弹性模量降低 28.84%。在低温后,RC-40 混凝土抗压强度提高 3.53%,KB 混凝土抗压强度提高 1.66%;RC-40 混凝土弹性模量提高 16.28%,KB 混凝土弹性模量降低 12.53%。掺入 40% 橡胶粉的 RC-40 混凝土试件的抗压强度、弹性模量均出现下降,但在经过低温之后,RC-40 混凝土的抗压强度提高程度略高于空白组,弹性模量也出现提升。

2)在抗压疲劳试验中,不同应力水平下,RC-40 混凝土压坏时的疲劳次数总是多于普通混凝土,且变化幅度更大。RC-40 混凝土在 0.75、0.80、0.85 应力水平下疲劳寿命相比于 KB 混凝土分别提高 83.39%、73.71%、31.11%。

3)通过疲劳试验,得出了混凝土的 S-N 曲线,拟合出了其对应的单对数疲劳方程,其相关系数都接近于 1,可以较好的反映不同混凝土的疲劳特性。随着试验应力水平的提高,RC-40 混凝土和普通混凝土试件可承受的疲劳寿命次数不断降低,其对数值也在不断减小,S-N 曲线逐渐向上延伸。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 赵江霞. 橡胶混凝土动态力学性能研究进展[J].混凝土, 2020(08): 37-40.

[2] 王婷雅. 不同粒径的橡胶混凝土低温抗压强度试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(07): 2308-2313.

[3] 薛刚. 考虑温度作用的橡胶混凝土动态轴心抗压性能[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(02): 243-253.

[4] CHEN C, CHEN X, ZHANG J. Experimental study on flexural fatigue behavior of self-compacting concrete with waste tire rubber[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2019, 28: 1-12.

[5] GANESAN N. Flexural fatigue behavior of self-compacting rubberized concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 7-14.

[6] LIU F. Mechanical and fatigue performance of rubber concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 711-719.

[7] LIU F. Fatigue performance of rubber-modified recycled aggregate concrete (RRAC) for pavement [J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 207-217.

[8] ZHANG Y M, ZHAO Z. Internal stress development and fatigue performance of normal and crumb rubber concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27: 2.

[9] 王立燕. 运用声发射技术研究橡胶混凝土疲劳损伤过程[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(03): 574-579.

[10] 刘妙燕. 疲劳荷载对橡胶混凝土损伤和断裂性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(05): 1594-1603.

[11] 付建. 废弃橡胶混凝土疲劳性能的研究[J]. 应用化工, 2021, 50(04): 943-945.

[12] 杨荣周,徐颖,郑强强,等. 分级等荷循环受压下橡胶水泥砂浆的疲劳损伤演化[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 961-969.

[13] 胡艳丽. 不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(01): 85-92.

[14] 袁勇. 橡胶混凝土动力性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008(09): 1186-1190.

[15] 冯文贤,刘锋,郑万虎. 橡胶混凝土疲劳性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(04): 469-473.

[16] 刘聪. 预应力道面混凝土的弯拉与疲劳特性[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(01): 211-217.

Mechanical and Fatigue Properties of Rubber Concrete

YAN Yan<sup>1</sup>, KONG Yu<sup>1</sup>, WANG Yingbin<sup>1</sup>, ZHAO Hang<sup>2</sup>, BAI Yinghua<sup>1</sup>

(1 School of Civil Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;  
2 Engin. Agent Construction Management Office of Air Force Logistics Dep., Xinjin 611430, China)

**Abstract:** In order to study the compressive strength and elastic modulus of 40% rubber concrete and the influence of low temperature environment on it, compressive and elastic modulus tests were carried out. Compressive fatigue tests were conducted on rubber concrete at different stress levels, and the compressive fatigue characteristics of different concrete were described by establishing fatigue equation. The results show that the compressive strength and modulus of elasticity of rubber concrete with 40% volume fraction are reduced by 34.64% and 28.84%. The compressive strength and elastic modulus of rubber concrete are increased by 3.53% and 16.28% at 40 C. The fatigue life times of rubber concrete at stress levels of 0.75, 0.80 and 0.85 are respectively increased by 83.39%, 73.71% and 31.11%. The single logarithmic fatigue equation is used to describe the fatigue characteristics of concrete, and the correlation coefficients of different concrete regression equations are close to 1, which can better reflect the fatigue characteristics of concrete and provide reference for the fatigue life prediction of rubber concrete under different stress levels.

**Keywords:** rubber concrete; low temperature; elastic modulus; compressive fatigue

[责任编辑: 裴 琴]