

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.007

# 冻融条件下公路桥梁板式氯丁橡胶支座受压试验研究

张延年<sup>1</sup>, 单春红<sup>1</sup>, 郑 怡<sup>2</sup>, 熊卫士<sup>3</sup>, 沈小俊<sup>4</sup>, 高 飞<sup>4</sup>

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168; 2. 辽宁省建筑材料监督检验院, 沈阳 110032;  
3. 重庆交通建设(集团)有限责任公司, 重庆 401147; 4. 重庆市公路工程质量检测中心, 重庆 400060)

**摘 要:**公路桥梁橡胶支座比建筑橡胶支座更容易受到气候的影响,为了研究公路桥梁板式氯丁橡胶支座经过冻融循环后的承载力变化情况,采用标准冻融试验箱对氯丁橡胶支座进行 25、50、75、100 次的冻融循环处理并进行轴心受压试验,研究其在不同冻融循环次数的承载力、极限抗压强度、竖向刚度、弹性模量等各项性能指标的变化,并与标准试件进行对比分析。结果表明经过冻融循环处理的氯丁橡胶支座更容易发生脆性破坏,且钢板外露、裂缝等破坏现象比标准试件更严重。随着冻融循环次数的增加,冻融程度的加深,氯丁橡胶支座极限承载力、极限抗压强度、抗压弹性模量都逐渐降低;采用最小二乘法得出 50 a 抗压强度和抗压弹性模量的衰减曲线和衰减公式,其变化趋势基本符合指数函数规律。冻融循环后的公路桥梁板式氯丁橡胶支座的各项力学性能指标显著降低,因此应严格控制公路桥梁板式氯丁橡胶支座的温度适用范围,并建议提高其最低适用温度,在寒冷地区尽量采用天然橡胶支座。

**关键词:**氯丁橡胶支座;轴心受压试验;承载力;竖向刚度

**中图分类号:**U443 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)06-0040-06

## Compression Tests of Plain Chloroprene Rubber Bearings of Highway Bridge Under Freeze-thaw Cycle Condition

Zhang Yannian<sup>1</sup>, Shan Chunhong<sup>1</sup>, Zheng Yi<sup>2</sup>, Xiong Weishi<sup>3</sup>, Shen Xiaojun<sup>4</sup>, Gao Fei<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, 110168, P. R. China;  
2. Supervision and Inspection Institute of Building Material in Liaoning Province, Shenyang, 110032, P. R. China;  
3. Chongqing Communications Construction Group, Chongqing 401147, P. R. China;  
4. Chongqing Highway Engineering Quality Inspection Center, Chongqing 400060, P. R. China)

**Abstract:** The climate has a great impact on highway bridge rubber bearings than on building rubber bearings. In order to study the change of the mechanical properties during the life of the plain chloroprene rubber bearings of highway bridge under freeze-thaw cycle condition, the plain chloroprene rubber bearings were processed 25, 50, 75, 100 times by freeze-thaw cycle in the standard freeze-thaw chamber, then the axial compression tests were carried. The changes of the performance indicators in the bearing capacity, the ultimate compressive strength, vertical stiffness, elastic modulus under different freeze-thaw cycles were analyzed comparatively. The results show that the plain chloroprene rubber bearings are more prone to brittle failure after the freeze-thaw cycle, and the failure phenomena of steel plate exposing or cracks is more serious than the phenomena of the standard specimen. With the increase of the number of freeze-thaw

收稿日期:2013-03-25

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ16B05);重庆市科技攻关计划项目(CSTC2011AC6157);辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划(LJQ2011061);辽宁省教育厅科研项目(LS2010135)

作者简介:张延年(1976-),男,教授,博士,主要从事防灾减灾研究,(E-mail)zyntiger@163.com.

cycle, the ultimate bearing capacity, ultimate compressive strength and compressive elastic modulus of the plain chloroprene rubber bearings decrease. The attenuation formula and decay curve in 50 years of ultimate compressive strength and elastic modulus of compression are analyzed by least square method, the trends of change are both in line with the exponential function. The mechanical properties of plain chloroprene rubber bearings of highway bridge significantly decreased under freeze-thaw cycle condition, therefore, the temperature ranges of plain chloroprene rubber bearings of highway bridge should be strictly controlled, and some suggestions, such as increasing its minimum applicable temperature, using the natural rubber bearings as much as possible in cold regions, have been given.

**Key words:** plain chloroprene rubber bearings; axial compression test; carrying capacity; vertical stiffness

板式橡胶支座由多层均匀分布的橡胶与钢板粘接叠合而成,是重要的承力和抗震减振装置,其质量直接影响支座的作用功能、安全可靠度和使用寿命。针对板式橡胶支座耐久性的研究已有较多<sup>[1-2]</sup>, Kalpakidis与杜永峰<sup>[3-5]</sup>等对高温下叠层橡胶支座的受力性能进行研究; Takenaka<sup>[6]</sup>对叠层橡胶支座的熱力学性能进行了实验研究;由世岐等<sup>[7]</sup>对低温环境下叠层橡胶支座变形特性进行研究;吴波等<sup>[8]</sup>对隔震橡胶支座防火性能进行了研究;Gu等<sup>[9-11]</sup>对桥梁天然橡胶支座的老龄化性能进行了研究;李慧等<sup>[12]</sup>进行了一20~-50℃寒冷环境下的隔震叠层橡胶支座的性能试验。许冬华等<sup>[13]</sup>研究表明氯丁橡胶在低于10℃时开始出现轻微结晶现象,低于0℃时,结晶现象加剧,橡胶变硬,硬度和定伸应力的增大,影响支座的弹性模量,温度继续降低,这种现象更加明显<sup>[13]</sup>。在世界的温带及寒带地区,气温变化较大,在这种环境下,公路桥梁橡胶支座比建筑橡胶

支座更容易受到气候的影响。迄今关于氯丁橡胶支座在冻融循环下的耐久性研究十分匮乏。因此对桥梁板式氯丁橡胶支座进行冻融循环处理,而后对其进行轴心受压试验,研究其受压性能,并利用最小二乘法给出相关的衰减曲线和衰减模型。

## 1 试件概况

### 1.1 试件基本属性

根据《公路桥梁板式橡胶支座规格系列》选取试件,其形状及尺寸如图1所示,试件由衡水鑫力工程有限公司生产加工,其物理机械性能如表1所示。

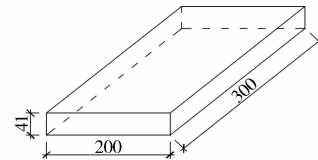


图1 氯丁橡胶支座形状及尺寸

表1 氯丁橡胶支座的物理机械性能

试件规格 与类型	硬度 (IRHD)	拉伸强度/ MPa	扯断 伸长率/%	橡胶与钢板 粘结剥离强度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	极限抗压 强度 R <sub>u</sub> / MPa	抗压弹性 模量 E/ MPa	抗剪弹性 模量 G/MPa	老化后抗剪 弹性模量 G/MPa
GJZ200×300×41(CR)	63	18.4	454	10.6	70	293	1.00	1.00

### 1.2 试件分组

试件共分为5组,1组为在自然状态下的标准试件,另外4组为在标准冻融试验箱中进行冻融循环处理的试件,其分组情况如下表2所示。

表2 氯丁橡胶支座冻融循环处理分组

试件序号	试件编号	循环次数
1	GJZ200×300×41(CR)ZYBZ01	0
2	GJZ200×300×41(CR)ZYDR025	25
3	GJZ200×300×41(CR)ZYDR050	50
4	GJZ200×300×41(CR)ZYDR075	75
5	GJZ200×300×41(CR)ZYDR100	100

橡胶支座在辽宁省建筑材料监督检验院进行冻融循环处理,处理次数分别为25、50、75、100次。冻融循环处理分为冻和融两部分,冻的部分在标准冻融试验箱中进行,融的部分在水中进行。首先将试件放入-15℃的冷库中,试件间距大于20 mm,冷冻4 h后取出,再置于水温为20℃的水池中融化2 h,水面高出试件20 mm以上,试件间距大于20 mm,这样就完成了一个冻融循环。达到规定循环次数后,将试件从水中取出,拭干表面。氯丁橡胶支座的冻融循环处理情况如图2所示。

试件应测量其处理前及处理后的尺寸,经过冻融循环处理,尺寸出现了细微变化。尺寸测量按照



图 2 氯丁橡胶支座冻融循环处理情况

《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4-2004)<sup>[14]</sup> 中方法进行。氯丁橡胶支座的尺寸变化见表 3。

表 3 氯丁橡胶支座尺寸变化

试件序号	试件编号	冻融循环前尺寸/(mm×mm×mm)	冻融循环后尺寸/(mm×mm×mm)
1	GJZ200×300×41(CR)ZYBZ01	200×301×41	
2	GJZ200×300×41(CR)ZYDR025	199×300×41	199×299×40
3	GJZ200×300×41(CR)ZYDR050	200×300×40	200×300×40
4	GJZ200×300×41(CR)ZYDR075	199×300×40	198×299×40
5	GJZ200×300×41(CR)ZYDR100	199×300×39	199×299×39



图 3 轴心受压前氯丁橡胶支座状态



图 4 试验装置

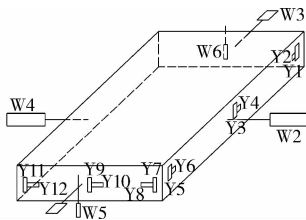


图 5 测点布置图

## 2.2 加载方案

试验为轴心受压试验,采用分级加载方式,进行预压与正式加载。在预压时进行物理对中与几何对中,检测各测点的稳定性,其数值应基本一致,偏差应在 15% 以内<sup>[14]</sup>。加载过程持续到出现极限荷载,

试件冻融循环处理后,即轴心受压试验前试件的初始状态如图 3 所示。

## 2 轴心受压试验

### 2.1 试验装置

轴心受压试验在沈阳建筑大学结构实验室进行,采用如图 4 所示的 5 000 kN 压力试验机。试件贴有 12 个应变片,6 个竖向,6 个横向;同时采用 6 个位移计测量其位移。图 5 的测点布置图中  $y$  代表应变片,  $W$  代表位移计。

承载力下降,试件破坏为止。

### 2.3 试验现象

进行轴心受压试验时,观察试验现象。逐级增加竖向荷载,未达到开裂荷载时,试件处于弹性状态,水平和竖向位移随荷载增加而增加,且与荷载的增加基本呈线性关系,此时观察试件表面,并未产生裂缝,外观变化较小;继续加载,达到开裂荷载时,试件边缘钢板与橡胶粘合处出现细微裂缝,此时荷载稍微有停滞状态,但很快恢复,而后荷载继续增加,水平位移也急剧增加,竖向位移变化较慢,裂缝变宽、变长,试件边缘开始产生凸出现象;当快达到破坏荷载时,水平位移及竖向位移增加较小;达到破坏荷载,承载力陡然下降,迅速减小,水平位移及竖向位移不再增加,裂缝达到最大,试件破坏。破坏位置主要是橡胶与钢板的粘合处,钢板与橡胶产生脱离,出现层状破坏。从各组试件的破坏现象观察,ZYBZ01 的弹性阶段比冻融循环处理过的试件长,极限承载力较大;而冻融循环处理的试件,随冻融循环次数增加,弹性阶段缩短,极限承载力减小,试件裂缝较多、较大,破坏严重。图 6 为试件的破坏形态。



图 6 氯丁橡胶支座破坏形态

表 4 氯丁橡胶支座弹性阶段各项指标对比

试件编号	极限承载力/kN	极限抗压强度/MPa	极限抗压强度下位移/mm			压应力 70 MPa 下位移/mm		
			竖向	纵向水平	横向水平	竖向	纵向水平	横向水平
GJZ200×300×41(CR)ZYBZ01	4 571.51	76.19	7.24	11.41	9.43	6.39	9.08	7.35
GJZ200×300×41(CR)ZYDR025	3 530.03	58.83	3.95	3.81	2.82	5.26	6.18	4.64
GJZ200×300×41(CR)ZYDR050	3 397.63	56.63	4.30	3.25	5.47	6.20	5.72	7.49
GJZ200×300×41(CR)ZYDR075	3 293.14	54.89	3.76	3.51	5.42	5.46	6.61	9.58
GJZ200×300×41(CR)ZYDR100	3 179.91	53.00	3.66	3.63	3.19	5.50	6.89	6.49

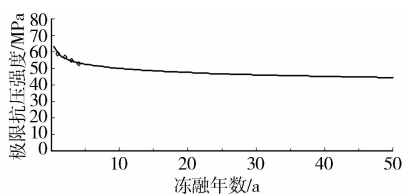


图 8 极限抗压强度拟合曲线

### 3 试验结果及数据分析

在弹性阶段,不同冻融循环次数对桥梁板式氯丁橡胶支座的各项指标都有一定程度的影响,表 4 为弹性阶段的各项指标对比。

#### 3.1 冻融循环对承载力的影响

极限承载力的衰减曲线如图 7 所示,在弹性阶段,标准件的极限承载力最大,经冻融循环处理的试件的极限承载力随循环次数的增加而减小。同时,在达到极限承载力时,经冻融循环处理过的试件各向位移均小于标准试件,且破坏情况严重,裂缝更长、更宽。

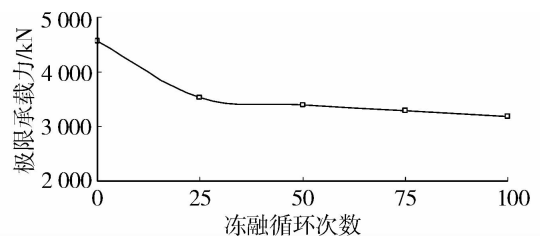


图 7 氯丁橡胶支座弹性阶段承载力变化曲线

#### 3.2 冻融循环对极限抗压强度的影响

只有标准试件极限抗压强度超过 70 MPa,经过冻融循环处理的试件的极限抗压强度均低于 70 MPa,且随着循环次数的增加,极限抗压强度降低。将极限抗压强度下的位移与压应力为 70 MPa 下的位移进行比较,除标准试件外,其他试件位移均小于压应力为 70 MPa 下的位移,这说明在达到压应力达到 70 MPa 时,试件已完全失去稳定性。

根据《军用设备气候极值》(GJB1172.11-91)<sup>[15]</sup>数据及统计温带地区在冬季的最高及最低平均气温显示,中国东北、华北及西北地区(除青海)的平均年冻融循环日数一般为 60~130 d,实际冬季的昼夜温差约为 12℃,而实验的温差为 35℃,因此 1 次快速冻融循环约为实际 1 次冻融循环的 3 倍,此时 25、50、75、100 次冻融循环大约为实际的 1、2、3、

4 a 的冻融情况,将极限抗压强度的数据通过曲线拟合成 50 a 氯丁橡胶支座的极限抗压强度,采用最小二乘法进行处理,其拟合曲线如图 8 所示。

极限抗压强度衰减曲线符合乘幂函数,采用最小二乘法进行计算,氯丁橡胶支座的极限抗压强度衰减模型为:

$$y = 59.12x^{-0.0728} \quad (1)$$

式中:  $y$  为极限抗压强度,  $x$  为冻融年数。

将  $x = 1, 2, 3, 4$  代入公式中分别得  $y = 59.12, 56.21, 54.58, 53.44$ , 与试验数据的比值平均值为 0.998, 标准差为 0.017, 变异系数为 0.017, 结果表明公路桥梁板式氯丁橡胶支座的极限抗压强度的衰减模型拟合公式与实际情况符合较好。由于统计冻融循环日数及昼夜温差为我国东北、华北及西北地区(除青海)的情况,则此衰减模型适用于我国东北、华北及西北地区(除青海)。

### 3.3 冻融循环对竖向刚度的影响

对于橡胶支座的竖向刚度,由式(2)计算<sup>[16]</sup>其实测竖向刚度:

$$K_v^T = \frac{P_2 - P_1}{Y_2 - Y_1} \quad (2)$$

式中:  $P_1$  为第 3 次循环加载时的较小压力;  $P_2$  为第 3 次循环加载时的较大压力;  $Y_1$  为第 3 次循环加载时的较小位移;  $Y_2$  为第 3 次循环加载时的较大位移。

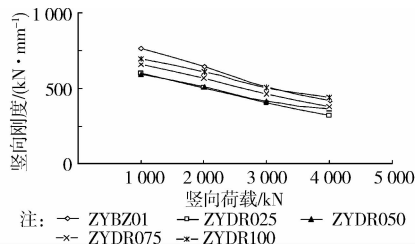


图 9 荷载-竖向刚度曲线

图 9 为氯丁橡胶支座的实测竖向刚度的变化曲线,竖向荷载的大小影响着竖向刚度变化,竖向刚度随竖向荷载的增大而减小,同时,经过冻融循环处理的试件的竖向刚度小于标准试件。竖向刚度减小,氯丁橡胶支座的稳定性变差。

### 3.4 冻融循环对抗压弹性模量的影响

对于氯丁橡胶支座的抗压弹性模量的研究由公式(3)进行计算<sup>[14]</sup>,选取  $y_1 - y_{12}$  测点数值进行计算:

$$E_1 = \frac{\sigma_{10} - \sigma_4}{\varepsilon_{10} - \varepsilon_4} \quad (3)$$

式中:  $E_1$  为试样实测的抗压弹性模量计算值,精确至 1 MPa;  $\sigma_4, \varepsilon_4$  为第 4 MPa 级试验荷载下的压应力和累计压缩应变值;  $\sigma_{10}, \varepsilon_{10}$  为第 10 MPa 级试验荷

载下的压应力和累计压缩应变值。

表 5 氯丁橡胶支座的实测弹性模量对比

试件编号	实测抗压弹性模量/MPa	初始抗压弹性模量 $E$ /MPa
GJZ200×300×41(CR)ZYBZ01	292.42	293
GJZ200×300×41(CR)ZYDR025	171.03	293
GJZ200×300×41(CR)ZYDR050	162.13	293
GJZ200×300×41(CR)ZYDR075	155.47	293
GJZ200×300×41(CR)ZYDR100	152.75	293

表 5 为氯丁橡胶支座的实测弹性模量对比,标准试件的抗压弹性模量的数值与厂家提供的弹性模量数值基本一致。经过冻融循环处理的试件的抗压弹性模量明显低于标准试件,且随着冻融循环次数的增加,试件的抗压弹性模量逐渐降低。

采用最小二乘法,将实测抗压弹性模量数据通过曲线拟合成 50 a 氯丁橡胶支座的抗压弹性模量。从表 5 中数据变化趋势来看,抗压弹性模量符合幂函数,采用最小二乘法进行计算,氯丁橡胶支座的抗压弹性模量衰减模型为:

$$E = 171.17x^{-0.0835} \quad (4)$$

式中:  $E$  为抗压弹性模量,  $x$  为冻融年数。

将  $x = 1, 2, 3, 4$  代入公式(4)中分别得  $E = 171.17, 161.54, 156.17, 152.46$ , 与试验数据的比值平均值为 1, 标准差为 0.004, 变异系数为 0.004, 结果表明公路桥梁板式氯丁橡胶支座抗压弹性模量衰减模型拟合公式与实际符合较好。

## 4 结论

1) 经过冻融循环处理的氯丁橡胶支座的破坏情况比标准试件严重,且循环次数越多,裂缝越大,钢板外露情况越明显,层状破坏越严重。

2) 氯丁橡胶支座的弹性阶段随冻融循环增加而缩短,经过处理的试件的极限承载力较标准试件低,极限承载力随冻融循环次数增加而降低。

3) 冻融循环处理的试件的极限抗压强度小于标准试件,且随着冻融循环次数的增加,极限抗压强度逐渐降低,采用最小二乘法对数据进行拟合,得出的 50 a 的衰减模型符合实际情况。

4) 氯丁橡胶支座的竖向刚度受冻融循环影响,经过冻融循环处理试件的竖向刚度低于标准试件。

5) 冻融循环对氯丁橡胶支座的抗压弹性模量影响较大,采用最小二乘法对数据进行拟合,得出的 50 a 的衰减模型符合实际情况。

6) 冻融循环后,公路桥梁板式氯丁橡胶支座的

各项力学性能指标显著降低,已无法满足实际工程需求,因此应严格控制公路桥梁板式氯丁橡胶支座的温度适用范围,并建议提高其最低适用温度,在寒冷地区尽量采用天然橡胶支座。

#### 参考文献:

- [1] Itoh Y, ASCE M, Gu H S. Prediction of aging characteristics in natural rubber bearings used in bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2009, 14(2):122-128.
- [2] Takaoka E, Takenaka Y, Nimura A. Shaking table test and analysis method on ultimate behavior of slender base-isolated structure supported by laminated rubber bearings [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(5):551-570.
- [3] Kalpakidis I V, Constantinou M C. Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearings. 1: theory [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(11):1440-1449.
- [4] Kalpakidis I V, Constantinou M C. Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearings. 2: verification of theory [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(11):1450-1461.
- [5] 杜永峰,寇佳亮,寇巍巍. 高温下叠层橡胶支座的热力学分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2010, 36(6):150-153.  
Du Y F, Kou J L, Kou W W. Analysis of thermal mechanical of lam inated rubber bearing under high temperature [J]. *Sichuan Building Science*, 2010, 36(6):150-153.
- [6] Takenaka Y. Experimental study on heat-mechanics interaction behavior of laminated rubber bearings [J]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2009, 646(74):2245-2253.
- [7] 由世岐,刘斌,楼永林. 低温环境对叠层橡胶支座变形特性影响的试验研究[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2005, 3(26):297-299.  
You S Q, Liu B, Lou Y L. Low-temperature effect on deformation behavior of laminated rubber isolators [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2005, 26(3):297-299.
- [8] 吴波,韩力维,周福霖等. 隔震橡胶支座防火保护试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(2):107-112.  
Wu B, Han L W, Zhou F L. Experimental study on fire protection of rubber isolation bearings [J]. *Journal of Building Structure*, 2011, 32(2):107-112.
- [9] Gu H S, Itoh Y. Ageing behaviour of natural rubber and high damping rubber materials used in bridge rubber bearings [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(6):1105-1113.
- [10] Gu H S, Itoh Y. Aging inside natural rubber bearings and prediction method[J]. *Journal of Beijing University of Technology*. 2012, 38(2):186-193.
- [11] Gu H S, Itoh Y. Aging behaviors of natural rubber in isolation bearings [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 163:3343-3347.
- [12] 李慧,邓学晶,杜永峰,等. 寒区叠层橡胶隔震支座拟静力试验研究[J]. *低温建筑技术*, 2003(4):33-35.  
Li H, Deng X J, Du Y F. Pseudo-static experimental study of rubber isolator under low temperature [J]. *Low-temperature Construction Techniques*, 2003(4):33-35.
- [13] 许冬华,吴华丰,王建芬. 环境温度对氯丁橡胶支座压剪性能试验的影响[J]. *公路*, 2010, 55(1):76-78.  
Xu D H, Wu H F, Wang J F. The affect of the environmental temperature on the neoprene rubber bearings the shear properties [J]. *Highway*, 2010, 1:76-78.
- [14] JT/T4-2004 公路桥梁板式橡胶支座[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [15] GJB1172.11-91 军用设备气候极值[S]. 北京:中国标准出版社,1991.
- [16] GB/T20688.1-2007 橡胶支座:第1部分,隔震橡胶支座试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

(编辑 胡玲)