

厚层铅芯橡胶支座力学性能

朱玉华, 艾方亮, 任祥香, 卢文胜

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 设计了 3 种不同单层橡胶厚度的厚层铅芯橡胶支座并进行力学性能试验, 研究其竖向压缩刚度、水平等效刚度、屈服后刚度、屈服力、等效阻尼比等基本力学性能, 分析其随压应力、剪应变等的变化规律, 并与现有的力学性能理论值进行比较. 结果表明, 竖向刚度试验值和理论值相差较大, 且随着单层橡胶厚度的增大而增大; 针对竖向刚度试验提出了拟合公式, 该公式与试验结果吻合较好; 受样本数量的限制, 拟合公式的适用性有待进一步验证; 厚层铅芯橡胶支座的水平力学性能与理论值较接近.

关键词: 厚层铅芯橡胶支座; 力学性能; 竖向刚度; 水平性能; 拟合公式

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Mechanical Properties of Thick Lead-Rubber Bearings

ZHU Yuhua, AI Fangliang, REN Xiangxiang, LU Wensheng
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Three kinds of thick lead-rubber bearings (TLRB) with different thicknesses of rubbers were designed in this paper. The basic mechanical properties of the TLRB were studied through mechanical properties test, such as vertical stiffness, equivalent horizontal stiffness, post-yield stiffness, yield shear force, and equivalent damping ratio. The effects of pressure stress and shear strain on mechanical properties of TLRB were studied. The comparison of mechanical properties between test and formula were analyzed. It is concluded that the difference of vertical stiffness of TLRB between test and formula is apparent and the difference is increasing as the thickness of rubber increases. The fitting formula of vertical stiffness about test was given, and the effect of fitting was satisfying. Because of the limit of samples, the applicability of the fitting formula should be checked in future work. The test value of horizontal properties of TLRB are similar to the

formula value.

Key words: thick lead-rubber bearings; mechanical properties; vertical stiffness; horizontal properties; fitting formula

基础隔震技术通过在基础结构和上部结构之间设置隔震层, 使上部结构与地震动的水平成分隔离^[1]. 铅芯橡胶支座作为具有阻尼性能的隔震装置可有效延长上部结构的周期并吸收地震能量, 降低上部结构的地震反应, 在实际工程中得到了广泛的应用. 1994 年美国加州北岭地震中, 采用铅芯橡胶支座的南加州大学医院隔震性能良好, 在震后继续工作, 成为全地区的急救中心^[2]. 自 1993 年汕头市建成我国首栋采用叠层橡胶支座的房屋以来, 在全国各地相继建成了 6 000 多栋隔震房屋.

相对于水平隔震技术, 竖向隔震技术的发展较为缓慢. 针对竖向地震作用, 国内外研究人员对竖向隔震技术进行了一系列的研究. Fujita 等^[3]研究了由橡胶隔震支座和锥形弹簧组成的三维隔震系统对核电站的有效性. Lee 等^[4]对由楔形摩擦块和弹簧组成的竖向隔震装置进行了振动台试验研究. 孟庆利等^[5]提出了一种采用碟形弹簧的竖向半主动隔震装置并进行了振动台试验研究. 李爱群等^[6]、王维等^[7]开发了一种由铅芯橡胶支座和碟形弹簧组成的三维多功能隔振支座, 并对其隔振效果进行了研究. 贾俊峰等^[8]基于铅芯橡胶隔震垫、组合碟形弹簧和钢板阻尼器, 设计开发了一种新型三维隔震装置, 并进行了力学性能试验. 厚层橡胶支座是一种重要的竖向隔震形式. Pestalozzi 学校建筑采用厚层橡胶支座作为三维隔震系统应用于实际工程中^[9]. Kanazawa 等^[10]设计了第 2 形状系数 $S_2 = 4.1$ 的厚层橡胶支座, 研究其对核反应堆中设备的减震效果. Yabana

收稿日期: 2017-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51578411)

第一作者: 朱玉华(1965—), 女, 教授, 工学博士, 主要研究方向为基础隔震. E-mail: zyhua@tongji.edu.cn

通信作者: 卢文胜(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构性能试验. E-mail: wally@tongji.edu.cn

等^[11]针对内部设备的竖向隔震设计了厚层橡胶支座作为三维隔震装置并进行了力学性能试验. 魏陆顺等^[12]设计了一种三维隔震(振)支座并进行了性能试验, 其中竖向隔振部分采用厚层橡胶. Yamataka 等^[13]的研究表明厚层橡胶支座可有效实现地铁的振动和噪声控制, 并改善地铁上方建筑的舒适性. 邹立华等^[14]提出了一种新型预应力厚层橡胶支座, 推导了其水平刚度的解析计算公式.

在进行隔震结构振动台试验时, 受橡胶制作工艺的限制, 缩尺小支座的单层橡胶厚度相对较大, 第 1 形状系数 S_1 较小, 形成厚层橡胶支座. 徐忠根等^[15]使用高度和直径均为 18 mm 的小支座进行了振动台试验, 仅模拟了支座的屈服后刚度. 目前有关厚层橡胶支座的研究比较有限, 对厚层铅芯橡胶支座的研究较少, 厚层铅芯橡胶支座基本力学性能的变化规律是竖向隔震和隔震结构振动台试验亟待解决的关键问题. 本文设计了 3 种不同单层橡胶厚度的厚层铅芯橡胶支座并进行基本力学性能试验, 分析竖向性能与水平性能的压应力和剪应变相关性, 提出了关于厚层铅芯橡胶支座竖向刚度的拟合公式.

1 试验装置及试件

试验所采用的加载装置为 YAW-3000G 高刚

度双向加载试验机, 见图 1. 压剪试验系统竖向最大试验力为 3 000 kN, 竖向位移行程为 200 mm, 水平向最大剪切试验力为 ± 800 kN, 水平行程为 ± 200 mm, 试验加载控制和数据采集均由计算机完成. 采用双油压传感器测量试验力, 采用 NS-WY02 型、NS-WY04 型位移传感器测量位移.

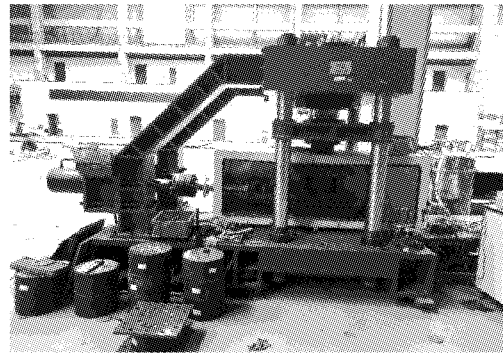


图 1 压剪试验装置

Fig. 1 The test machine

根据内部橡胶总厚度相同、单层橡胶厚度不同的设计原则, 制作了 3 种第 1 形状系数 S_1 不同的厚层铅芯橡胶支座, 第 2 形状系数 S_2 均为 2.7, 橡胶总厚度较厚, 支座有效直径均为 300 mm, 各支座尺寸参数见表 1.

表 1 厚层铅芯橡胶支座尺寸参数表

Tab. 1 Table of TLRB size

试件型号	有效直径 D/mm	铅芯直径 $D_{\text{lead}}/\text{mm}$	橡胶单层 厚度 t_r/mm	橡胶层 数 n	橡胶总厚 度 T_r/mm	薄钢板厚度 t_s/mm	封钢板 厚度/ mm	第 1 形状 系数 S_1
TLRB-1	300	60	4.5	25	112.5	2	15	16.7
TLRB-2	300	60	6.3	18	112.5	2	15	12.0
TLRB-3	300	60	9.4	12	112.5	2	15	8.0

2 试验方法

根据隔震橡胶支座压缩性能试验加载的方法^{2[16]}, 压应力 σ 分别取为 2、3、4、5、6 MPa, 分析竖向刚度的压应力相关性, 取第 3 次循环时的力和位移, 按式(1)计算支座的竖向刚度.

$$K_v = (P_2 - P_1)/(Y_2 - Y_1) \quad (1)$$

式中: P_1 、 P_2 分别为第 3 次循环时对应 $0.7P_0$ 和 $1.3P_0$ 的竖向压力, P_0 为设计压力; Y_1 、 Y_2 分别为 P_1 、 P_2 对应的竖向位移.

压剪试验采用单剪试验方法, 在竖向压应力 $\sigma = 4$ MPa 时, 分别施加剪应变 γ 为 50%、80%、100%、120%、150% 的剪切位移, 分析支座水平性能的剪应

变相关性; 在竖向压应力 σ 分别为 2、3、4、5、6 MPa 时, 施加剪应变 $\gamma = 100\%$ 的剪切位移, 分析支座水平性能的压应力相关性. 试验进行 3 次加载循环, 取第 3 次循环的测试值, 分别按式(2)~(5)计算水平等效刚度 K_h 、屈服后刚度 K_d 、屈服力 Q_d 和等效阻尼比 ξ_{eq} .

$$K_h = (Q_1 - Q_2)/(X_1 - X_2) \quad (2)$$

$$K_d = [(Q_1 - Q_{d1})/X_1 + (Q_2 - Q_{d2})/X_2]/2 \quad (3)$$

$$Q_d = (Q_{d1} - Q_{d2})/2 \quad (4)$$

$$\xi_{\text{eq}} = 2\Delta W/[\pi K_h (X_1 - X_2)^2] \quad (5)$$

式(2)~(5)中: Q_1 、 Q_2 分别为最大剪力和最小剪力; X_1 、 X_2 分别为最大位移和最小位移; Q_{d1} 、 Q_{d2} 分别为滞回曲线正向和负向与剪力轴的交叉点; ΔW 为滞回曲线的包络面积.

3 试验结果

3.1 竖向刚度的压应力相关性

对 3 种厚层铅芯橡胶支座(TLRB)进行了压应力分别为 2、3、4、5、6 MPa 时的竖向压缩试验,受篇幅限制,仅给出 TLRB-1 支座在设计压应力 σ_0 为 4 MPa 时的力 F 和位移 D 曲线,见图 2,图中位移为相对位移。从图 2 可以看出,厚层铅芯橡胶支座在竖向压缩试验中表现出一定的阻尼特性,因为厚层铅芯橡胶支座的单层橡胶厚度较厚,在竖向压力作用下,支座产生较大的竖向压缩位移,铅芯在压缩过程中发生横向鼓凸,侵入橡胶中,产生剪切变形,使得支座在竖向压缩试验中具有一定的阻尼特性。

TLRB-1、TLRB-2、TLRB-3 在压应力分别为 2、3、4、5、6 MPa 时的竖向刚度 K_V 的试验值见表 2。

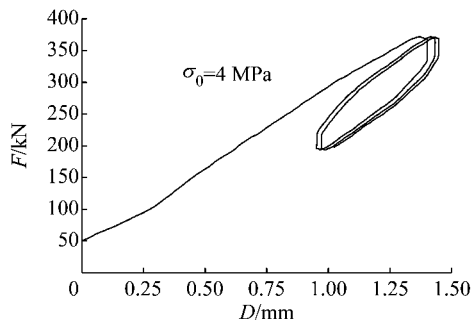


图 2 TLRB-1 支座竖向刚度试验结果

Fig. 2 Test result of vertical stiffness of TLRB-1

表 2 TLRB 支座的竖向刚度

Tab. 2 Vertical stiffness of TLRB

σ/MPa	$K_V/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$		
	TLRB-1	TLRB-2	TLRB-3
2	464.0	376.6	227.8
3	419.0	348.1	203.8
4	388.7	332.8	191.3
5	363.9	313.7	183.2
6	402.1	299.8	180.0

从表 2 可以看出,随着压应力的增大,3 种 TLRB 支座的竖向刚度均呈逐渐减小的趋势,其中 TLRB-1 支座在 6 MPa 作用下竖向刚度反常增大,该数据存在一定误差,可能与支座制作及试验过程有关;当压应力相同时,随着第 1 形状系数 S_1 的减小,单层橡胶厚度逐渐增大,支座的竖向刚度 K_V 逐渐减小。单层橡胶厚度越厚,在相同的竖向压力作用下,薄钢板对橡胶层的约束作用范围越小,橡胶的竖向压缩变形越大,竖向刚度 K_V 越小。

3.2 水平性能的剪应变相关性

对 3 种 TLRB 支座进行了设计压应力 σ_0 为 4 MPa,剪应变分别为 50%、80%、100%、120%、150% 的压剪试验,受篇幅限制,仅给出 TLRB-1 支座的滞回曲线,见图 3。水平等效刚度、屈服后刚度、屈服力、等效阻尼比随剪应变的变化曲线分别见图 4~7。

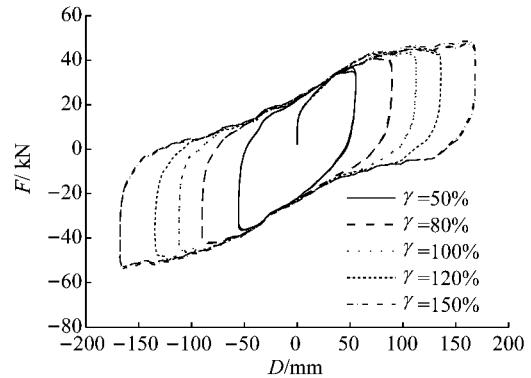


图 3 TLRB-1 支座的水平滞回曲线 ($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)

Fig. 3 Hysteresis loops of TLRB-1 ($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)

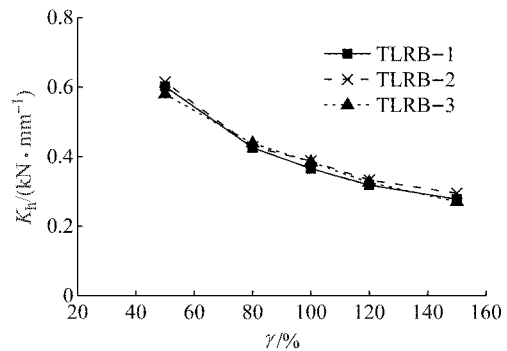


图 4 水平等效刚度随剪应变变化曲线 ($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)

Fig. 4 Equivalent horizontal stiffness versus shearing strain ($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)

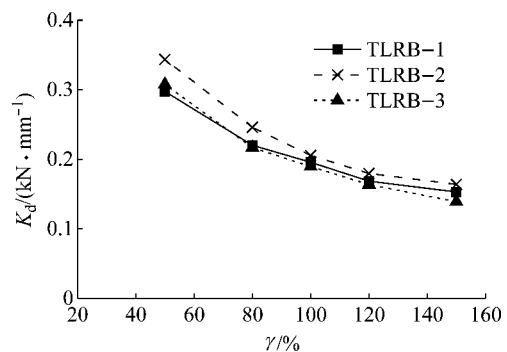


图 5 屈服后刚度随剪应变变化曲线 ($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)

Fig. 5 Post-yield stiffness versus shearing strain ($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)

由图 4~7 可以看出,水平等效刚度 K_h 、屈服后刚度 K_d 、等效阻尼比 ξ_{eq} 均随剪应变 γ 的增大而减小。3 种支座的第 1 形状系数 S_1 不同,但其水平等效

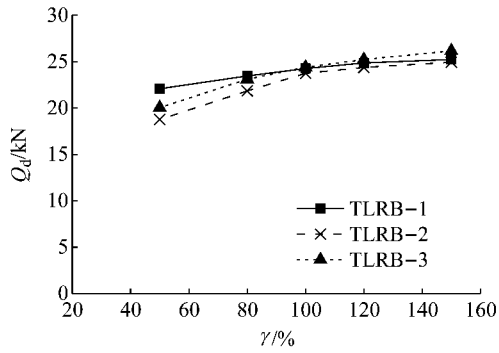


图 6 屈服剪力随剪应变变化曲线($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)
Fig. 6 Yield shear forces versus shearing strain ($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)

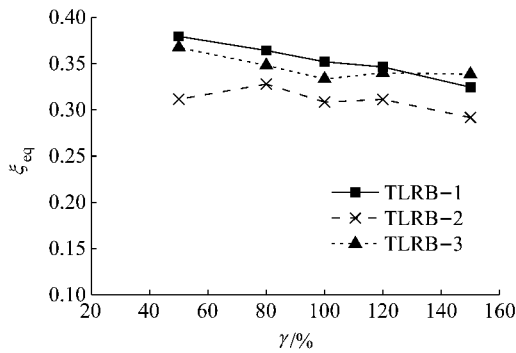


图 7 等效阻尼比随剪应变变化曲线($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)
Fig. 7 Equivalent damping ratios versus shearing strain ($\sigma_0 = 4 \text{ MPa}$)

刚度相差不大,随剪应变减小的变化曲线非常接近。屈服力 Q_d 随剪应变的变化幅度不大,屈服力 Q_d 主要由铅芯提供,在剪应变 $\gamma > 100\%$ 之后,屈服力 Q_d 基本保持在 25 kN 左右。

3.3 水平性能的压应力相关性

对 3 种 TLRB 支座进行了压应力分别为 2、3、4、5、6 MPa,剪应变为 100% 的压剪试验,受篇幅限制,仅给出 TLRB-1 支座的滞回曲线,见图 8。3 种 TLRB 支座的水平等效刚度、屈服后刚度、屈服力、等效阻尼比随剪应变的变化曲线分别见图 9~12。

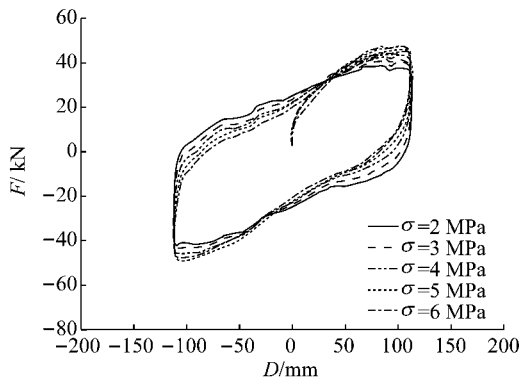


图 8 TLRB-1 支座的水平滞回曲线($\gamma = 100\%$)
Fig. 8 Hysteresis loops of TLRB-1($\gamma = 100\%$)

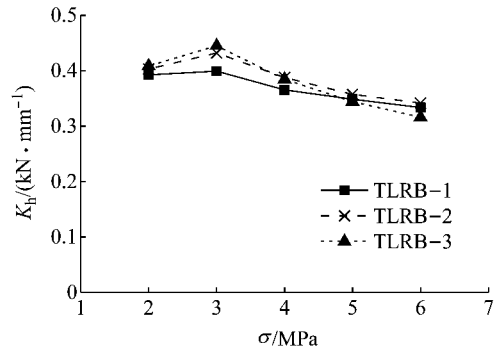


图 9 水平等效刚度随压应力变化曲线($\gamma = 100\%$)
Fig. 9 Equivalent horizontal stiffness versus pressure stress($\gamma = 100\%$)

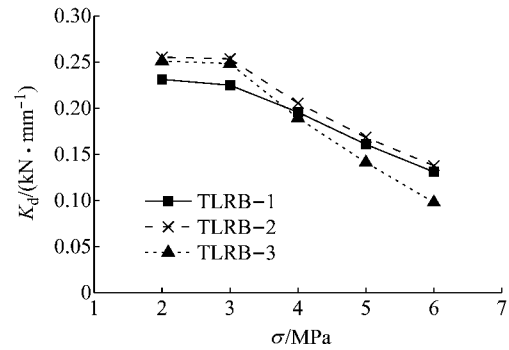


图 10 屈服后刚度随压应力变化曲线($\gamma = 100\%$)
Fig. 10 Post-yield stiffness versus pressure stress ($\gamma = 100\%$)

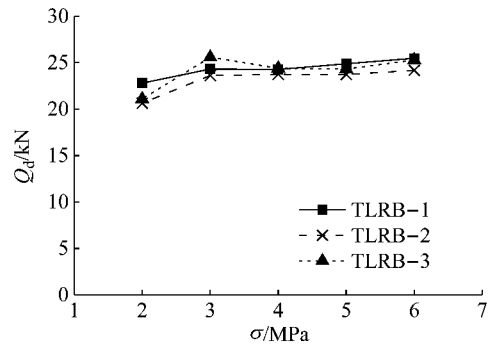


图 11 屈服剪力随压应力变化曲线($\gamma = 100\%$)
Fig. 11 Yield shear forces versus pressure stress ($\gamma = 100\%$)

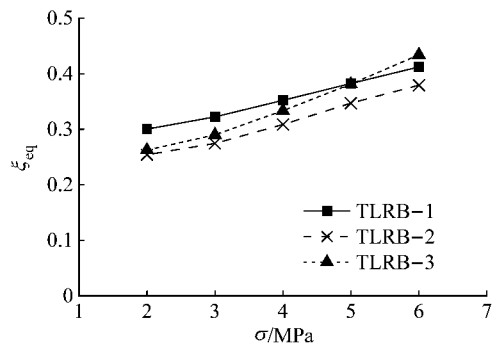


图 12 等效阻尼比随压应力变化曲线($\gamma = 100\%$)
Fig. 12 Equivalent damping ratios versus pressure stress($\gamma = 100\%$)

由图 9~12 可以看出,水平等效刚度 K_h 、屈服后刚度 K_d 随压应力的增大而减小;等效阻尼比 ξ_{eq} 随压应力的增大而增大. 3 种支座的水平等效刚度比较接近,随压应力的变化曲线基本相同. 屈服力 Q_d 随压应力的变化幅度不大,屈服力 Q_d 主要由铅芯提供,与铅芯的直径大小相关,在压应力 $\sigma > 3$ MPa 后,屈服力 Q_d 基本保持在 25 kN 左右.

4 试验结果与理论公式比较

4.1 竖向刚度的比较

铅芯橡胶支座的竖向刚度的理论值一般可按式(6)计算.

$$K_V = E_{cb}A/n t_r \quad (6)$$

$$E_{cb} = E_c E_b / (E_c + E_b) \quad (7)$$

$$E_c = E_0 (1 + 2\kappa S_1^2) \quad (8)$$

式(6)~(8)中: E_{cb} 为橡胶材料的修正压缩弹性模量; A 为铅芯橡胶支座的面积; E_c 为橡胶材料的压缩弹性模量; E_b 为橡胶材料的体积弹性模量; E_0 为橡胶材料的弹性模量; κ 为橡胶材料与硬度有关的修正系数.

对于铅芯橡胶支座,由于铅芯对橡胶支座的影响和相互作用,橡胶的压缩弹性模量会增大,在铅芯直径约为橡胶支座直径的 0.15~0.25 倍时,橡胶压缩弹性模量 E_0 与剪切模量 G 的关系近似有 $E_0 = 3.6G^{[17]}$.

TLRB 支座所使用的橡胶材料的剪切模量 $G = 0.42$ MPa, $\kappa = 0.862$, $E_b = 1\,960$ MPa,可求得 TLRB 支座竖向刚度的理论值,其与试验值的对比见表 3.

通过试验与理论公式对比发现,式(6)所计算的 TLRB 支座的竖向刚度比试验值小,最大相差达 2.3 倍. 在橡胶总厚度相同的情况下,普通支座在压力作用下,橡胶受到薄钢板的约束作用,产生“套箍”效应,橡胶的横向变形较小,支座竖向刚度较大. 对于厚层支座,单层橡胶厚度较大,薄钢板“套箍”效应的作用范围有限,使得橡胶的横向变形较大,支座的竖向刚度较小.

从表 3 可以看出,竖向刚度试验值与理论公式的比值随着压应力和第 1 形状系数 S_1 的增大而减小. 因此,在用式(6)计算 TLRB 支座的竖向刚度时,需要对其进行修正. 修正计算公式见式(9).

$$K_V = C E_{cb}A/n t_r \quad (9)$$

式中: C 为竖向刚度的修正系数. C 可通过对竖向刚

表 3 TLRB 支座竖向刚度的比较

Tab. 3 Comparison of vertical stiffnesses of TLRB

试件 型号	S_1	压应力/ MPa	$K_V/(kN \cdot mm^{-1})$			
			理论值	试验值	拟合值	
TLRB-1	16.7	2		464.0	1.39	0.93
		3		419.0	1.26	0.95
		4	332.7	388.7	1.17	0.95
		5		363.9	1.09	0.93
		6		402.1	1.21	1.07
TLRB-2	12.0	2		376.6	1.90	0.98
		3		348.1	1.75	1.01
		4	198.6	332.8	1.68	1.02
		5		313.7	1.58	0.99
		6		299.8	1.51	0.97
TLRB-3	8.0	2		227.8	2.34	1.02
		3		203.8	2.09	0.99
		4	97.4	191.3	1.96	0.98
		5		183.2	1.88	0.96
		6		180.0	1.85	0.96

度的试验值进行拟合,得到 C 与压应力 σ 及第 1 形状系数 S_1 有关的表达式为

$$C = 0.28(\sigma_0/\sigma) - 0.09S_1 + 2.45 \quad (10)$$

式中: $\sigma_0 = 4$ MPa,为设计压应力.

分别绘出 3 种 TLRB 支座竖向刚度试验值及拟合公式值随压应力的变化曲线,见图 13.

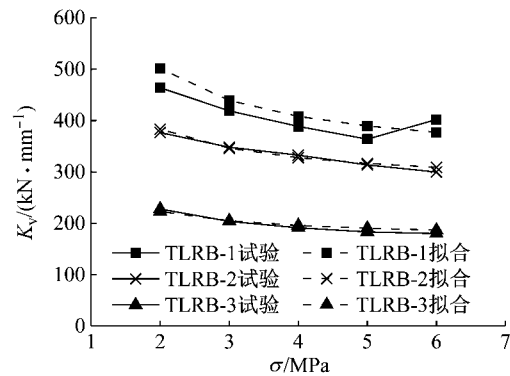


图 13 TLRB 支座竖向刚度随压应力变化曲线
Fig. 13 Vertical stiffness of TLRB versus test and fitting

由表 3 和图 13 可以看出,拟合公式计算值和试验值非常接近,但拟合公式的精度依赖于拟合分析的试验样本,所采用的支座试件和试验数据较少,样本参数覆盖的范围有限,拟合公式(9)的适用性有待进一步验证.

4.2 水平性能的比较

铅芯橡胶支座的水平等效刚度 K_h 、屈服后刚度 K_d 、屈服力 Q_d 可分别按式(11)~(13)计算.

$$K_h = K_d + Q_d/\gamma T_r \quad (11)$$

$$K_d = (GA_r + \alpha A_p)/T_r \quad (12)$$

$$Q_d = \sigma_{pb} A_p \quad (13)$$

式(11)~(13)中: A_r 为支座有效截面积; α 为橡胶水平弹性模量修正系数,取 $\alpha=0.588$; A_p 为铅芯面积; σ_{pb} 为铅芯水平屈服应力,取 $\sigma_{pb}=8.33$ MPa.

TLRB 支座在压应力为 4 MPa 时,剪应变 $\gamma=100\%$ 时的水平等效刚度 K_h 、屈服后刚度 K_d 的试验值与公式计算值的对比见表 4.

表 4 TLRB 支座水平性能试验值与理论值的比较

Tab. 4 Comparison of horizontal properties of TLRB between test and formula

试件 型号	$K_h/(kN \cdot mm^{-1})$			$K_d/(kN \cdot mm^{-1})$		
	理论值	试验值	试验值 理论值	理论值	试验值	试验值 理论值
TLRB-1	0.448	0.366	0.82	0.248	0.196	0.79
TLRB-2	0.448	0.388	0.87	0.248	0.206	0.83
TLRB-3	0.448	0.385	0.86	0.248	0.189	0.76

由表 4 可以看出,理论值与试验值误差平均接近 20%,现有普通铅芯橡胶支座水平性能的计算公式应用于厚层铅芯橡胶支座时存在一定的误差,其适用性有待进一步研究.对比分析 3 种 TLRB 支座的水平性能可知,在橡胶总厚度一定的情况下,单层橡胶厚度的变化对水平性能产生的影响较小.

5 结论

通过对 3 种不同单层橡胶厚度的厚层铅芯橡胶支座基本力学性能进行试验研究,对比分析其力学性能和理论计算公式的差异,可以得出以下结论:

(1)TLRB 支座在竖向压缩试验中产生较大的竖向位移,使得支座在竖向压力作用下具有一定的阻尼特性.

(2)TLRB 支座的竖向刚度随压应力的增大呈减小的趋势,单层橡胶越厚,竖向刚度越小.采用现有竖向刚度计算公式计算 TLRB 支座的竖向刚度时,需进行修正,给出的竖向刚度拟合公式效果较好.

(3)TLRB 支座的水平等效刚度、屈服后刚度、等效阻尼比均随剪应变的增大而减小;随压应力的增大,水平等效刚度、屈服后刚度随之减小,而等效阻尼比逐渐增大;TLRB 支座的屈服力主要和铅芯直径相关,与剪应变和压应力的相关性不大.

(4)现有普通铅芯橡胶支座水平性能的计算公式应用于厚层铅芯橡胶支座时存在一定的误差,其适用性有待进一步研究.在橡胶总厚度一定的情况下,单层橡胶厚度的变化对支座水平性能的影响较小.

参考文献:

- [1] 日本建筑学会.隔震结构设计[M].刘文光,译.北京:地震出版社,2006.
Japan Society of Architecture. Recommendation for the design of base isolated buildings[M]. Translated by LIU Wenguang. Beijing: Earthquake Press, 2006.
- [2] SKINNER R I, ROBINSON W H, MCVERRY G H. An introduction to seismic isolation[M]. Beijing: Earthquake Press, 1996.
- [3] FUJITA T, FUJITA S, WATANABE Y, *et al.* Fundamental study of three-dimensional seismic isolation system for nuclear power plants [C/CD] // Proceedings of the 11th WCEE. Acapulco: WCEE, 1996.
- [4] LEE Y, JI Y S, HAN W, *et al.* Shaking table test of vertical isolation device[J]. International Journal of Environmental Science and Development, 2014, 5(1): 5.
- [5] 孟庆利,林德全,张敏政.三维隔震系统振动台试验研究[J].地震工程与工程振动,2007,27(3):116.
MENG Qingli, LIN Dequan, ZHANG Minzheng. Study on three-dimensional isolated system in shaking table test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3): 116.
- [6] 李爱群,王维.三维多功能隔振支座设计及其在地铁建筑减振中的应用[J].地震工程与工程振动,2014,34(2):202.
LI Aiqun, WANG Wei. Design of a three dimensional isolation bearing and its application in building vibration control induced by underground train[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(2): 202.
- [7] 王维,李爱群,周德恒,等.新型三维多功能隔振支座设计及其隔振分析[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(4):787.
WANG Wei, LI Aiqun, ZHOU Deheng, *et al.* Design of novel three dimension multifunctional isolation bearing and its isolation behavior analysis[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2014, 44(4): 787.
- [8] 贾俊峰,欧进萍,刘明,等.新型三维隔震装置力学性能试验研究[J].土木建筑与环境工程,2012,34(1):29.
JIA Junfeng, OU Jinping, LIU Ming, *et al.* Mechanical performance tests of a novel three-dimensional isolation bearing [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(1): 29.
- [9] GAREVSKI M, KELLY J M, ZISI N. Analysis of 3D vibrations of the base isolated school building 'Pestalozzi' by analytical and experimental approach [C/CD] // The 12th WCEE. Auckland: WCEE, 2000.
- [10] KANAZAWA K, HIRATA K, MATSUDA A. Shaking table test of three-dimensional base isolation system using laminated thick rubber bearings[C]//The 15th SMiRT. Seoul: SMiRT, 1999: 367-374.
- [11] YABANA S, MATSUDA A. Mechanical properties of laminated rubber bearings for three-dimensional seismic isolation[C/CD] //The 12th WCEE. Auckland: [s. n.], 2000.