

吴迪,邱仕义,熊焱. 2022. 约束橡胶支座竖向力学性能有限元分析[J]. 地震研究, 45(4): 635–640, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0066.

Wu D, Qiu S Y, Xiong Y. 2022. The finite element analysis of the vertical mechanical properties of the confined rubber bearings[J]. Journal of Seismological Research, 45(4): 635–640, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0066.

## 约束橡胶支座竖向力学性能有限元分析\*

吴迪<sup>1</sup>, 邱仕义<sup>2</sup>, 熊焱<sup>3</sup>✉

(1. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510405; 2. 广州珠江外资建筑设计院有限公司, 广东 广州 510060;  
3. 华南理工大学 亚热带建筑科国家重点实验室, 广东 广州 510604)

**摘要:** 利用有限元方法对新型约束橡胶隔震支座进行有限元分析, 通过竖向单调加载的数值模拟, 分析竖向荷载作用下支座的竖向力学性能和极限承载能力。通过研究不同形状系数对橡胶支座竖向力学性能的影响, 结果显示: 相比于传统的叠层橡胶隔震支座, 约束橡胶隔震支座具有更低的竖向刚度, 并具有更高的竖向承载力, 能够提升结构的竖向减振效率。

**关键词:** 约束橡胶支座; 竖向刚度; 承载力; 力学性能; 有限元分析

**中图分类号:** TU352.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2022)04-0635-06

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0066

## 0 引言

目前, 工程结构防震减灾面临诸多新挑战, 包括地震与环境振动对城镇工程安全性和舒适性影响等问题。传统的叠层橡胶支座能够有效降低结构水平地震(振)动响应, 已被工程领域广泛采用。但由于叠层橡胶支座竖向刚度较高, 无法满足竖向工程结构隔震(振)的需求。为此, Tajirian等(1990)采用减少橡胶支座钢板数量的方法降低支座竖向刚度, 但由于厚层橡胶支座第一形状系数较低, 其稳定性与承载力有所下降(Warn, Vu, 2012)。徐永秋和刘文光(2008)通过静力试验发现厚层橡胶支座竖向刚度高于传统方法计算的结果。周颖等(2016)分析了建筑结构采用厚层橡胶支座的隔震效果。何文福等(2011)对比了不同振幅和频率组合下的普通橡胶支座、铅芯橡胶支座、厚层橡胶支座, 结果表明厚层橡胶支座的等效水平刚度可通过叠层橡胶理论计算公式获得。

李吉超等(2019)考虑橡胶层压缩模量、面积、厚度等变量, 提出一种积分修正方法计算厚层橡胶支座的竖向刚度, 与试验结果吻合较好。邹立华等(2013)提出一种预应力厚层橡胶支座, 用拉索控制支座的位移, 并建立其非线性分析模型。朱玉华等(2018)研究不同橡胶层厚的厚层铅芯橡胶支座, 分析其水平等效刚度及竖向刚度等性能。虽然厚层橡胶支座拥有较好的竖向隔震(振)性能, 但是由于支座的第一形状系数较低, 因此其承载能力受到较大限制(吴迪等, 2020a)。针对以上问题, 吴迪等(2020b)提出一种新型约束橡胶支座, 采用外部约束提高橡胶的稳定性和承载能力, 降低支座竖向刚度的橡胶支座。

本文针对约束橡胶隔震支座的构造特点开展数值仿真模拟研究, 建立约束橡胶支座的有限元模型, 与普通厚层橡胶支座进行对比分析, 分析条形外部约束板对支座的约束作用, 探究竖向刚度、承载力等竖向力学性能及影响因素, 对于工程结构三维隔震(振)技术有重要意义。

\* 收稿日期: 2021-12-28.

基金项目: 广州市教育局高校科研项目(201831826)资助.

第一作者简介: 吴迪(1978-), 副教授, 博士, 主要从事工程防灾工作. E-mail: 11795234@qq.com.

✉ 通讯作者简介: 熊焱(1978-), 副教授, 博士, 主要从事工程防灾工作. E-mail: xyan@scut.edu.cn.

## 1 基本特征参数

约束橡胶支座由橡胶支座本体、条形外部约束、上下连接板、高强螺栓等构成,如图 1 所示。根据《橡胶支座第 3 部分:建筑隔震橡胶支座》(GB/T 20688.3—2006)规定,普通叠层橡胶支座的第一形状系数( $S_1$ )大于 15,因此本文普通和厚层的叠层橡胶支座的  $S_1$  分别采用 15 和 9。约束橡胶支座橡胶层数为 9,钢板为 10 层,其他基本特征包括:支座最大直径  $D$ 、上部直径  $d$ 、钢板层厚度  $t_s$ 、橡胶层厚度  $t_r$ 、条形外部约束的宽度  $d_y$ 、厚度  $t_y$ 、封板厚度  $t_f$ 、橡胶剪切模量  $G$ 、橡胶弹性模量  $E_0$  等参数,具体见表 1。

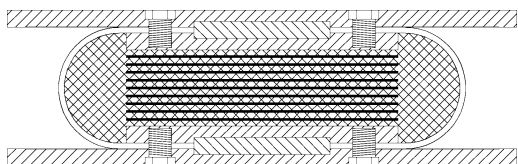


图 1 约束橡胶支座剖面图 (据吴迪等, 2020b)

Fig. 1 Sectional view of the restraining rubber bearings  
(according to Wu *et al.*, 2020b)

表 1 约束橡胶支座参数

Tab. 1 Constraint rubber bearing's parameters

参数	数值	参数	数值
$G/\text{MPa}$	0.64	$t_r/\text{mm}$	7
$E_0/\text{MPa}$	2.20	$t_f/\text{mm}$	5
$D/\text{mm}$	350	$d_y/\text{mm}$	50
$d/\text{mm}$	253	$t_y/\text{mm}$	5
$t_s/\text{mm}$	3		

## 2 本构关系和有限元模型

### 2.1 本构关系

(1) 橡胶材料的本构关系。橡胶材料是一种超弹性材料,大变形下的橡胶材料具有非线性、不可压缩性等特点。采用 Mooney - Rivlin 模型 (Mooney, 1940; Rivlin, 1948) 能够模拟橡胶的各向同性、不可压缩等基本力学特征,具体为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中:  $W$  为橡胶材料应变能密度;  $C_{01}$  和  $C_{10}$  分别为 Rivlin 系数,均为正定常数,可假定  $C_{01} = 0.25C_{10}$ ,橡胶的弹性模量  $E_0$  和剪切模量  $G$  可以表示为 (王伟等, 2004):

$$E_0 = 6(C_{01} + C_{10}) \quad (2)$$

$$G = 2(C_{01} + C_{10}) \quad (3)$$

(2) 钢材的本构关系采用《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定的应力 - 应变曲线。条形外部约束和叠层钢板分别采用低合金高强度 Q420 和碳素结构钢 Q235,在数值模拟中钢材采用非线性模型标准试件单向的应力 - 应变本构关系以 Ramberg - Osgood 模型为基础的三折线模型确定,即抗拉强度分别为 520 MPa、370 MPa,弹性模量均为  $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

### 2.2 破坏准则

根据国际的《结构支座——第 3 部分:橡胶支座规范》(EN1337 - 3—2005)的要求,在荷载作用下支座任意处的总名义应变  $\varepsilon_{t,d}$  满足:

$$\varepsilon_{t,d} = K_L(\varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{\alpha,d}) \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_{c,d}$  为支座因压缩变形产生的名义应变;  $\varepsilon_{q,d}$  为支座因剪切变形产生的名义剪应变;  $\varepsilon_{\alpha,d}$  为支座因转角变形产生的名义应变;  $K_L$  为荷载类型系数。其中,  $\varepsilon_{t,d}$  不应超过最大名义应变  $\varepsilon_{u,d}$ 。 $\varepsilon_{u,d}$  可表示为:

$$\varepsilon_{u,d} = \varepsilon_{u,k} / \gamma_m \quad (5)$$

式中:  $\gamma_m$  为安全系数,承载能力极限状态下  $\varepsilon_{u,d}$  取 700%。该指标反映了支座受力状态下的综合性能。此外,以钢材的抗拉强度作为条形外部约束板和加劲板的破坏限值,并据此判定支座发生破坏时所承受的竖向承载能力。

### 2.3 有限元模型

采用分割命令将橡胶和钢板划分成不同的区块,通过属性命令分别赋予橡胶和钢板材料属性,建立橡胶支座的实体有限元模型。为保证橡胶和条形外部约束板的固结关系,在数值分析时条形外部约束和鼓型橡胶支座本体的网格划分相一致、节点对应。在支座上表面中心处设置参考点,将参考点与橡胶支座上封板表面施加刚性耦合约束。在橡胶与条形外部约束之间设置绑定约束,条形

外部约束的变形较小且刚度较大,将其设置为接触对中的主面,将橡胶设置为接触对中的从面。

网格的划分对计算结果的收敛性和计算精度会产生一定影响。单片条形外部约束、单层橡胶、单层钢板、封板、环形橡胶的单元划分数目分别为1, 440、6, 320、5, 056、5, 056、124, 800个。约束橡胶支座有限元模型的单元划分情况如图2所示。由于减缩积分单元通过每个方向减少积分点的方法,在模拟时可以避免普通单元可能会出现体积自锁从而计算不收敛的情况,因此钢材

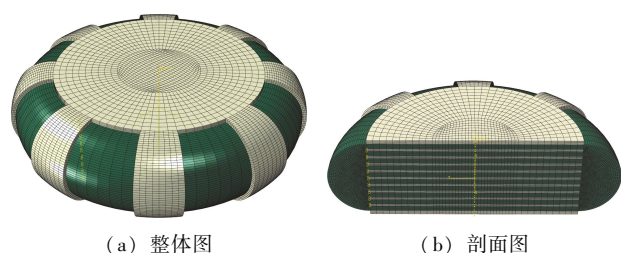


图2 约束橡胶支座有限元模型的单元划分

Fig. 2 Division of the finite element model of the restraining rubber bearings

采用八结点线性六面体减缩单元(C3D8R)来模拟。采用八结点线性六面体杂交单元(C3D8H)开展橡胶材料模拟,主要是由于在荷载作用下橡胶是不可压缩材料,单元的压应力不能利用节点位移场计算,而C3D8H单元包含一个可以直接确定单元压应力的附加自由度以及节点位移场,用于计算应变和应力。

### 3 竖向力学性能分析

以约束橡胶支座的竖向力学性能为研究对象,利用通用有限元软件ABAQUS的CAE模块建立数值仿真模型。在模拟支座竖向加载过程中,对支座上和下封板的所有自由度进行约束。再采用Standard模块对有限元模型进行数值仿真分析。

#### 3.1 竖向荷载-位移曲线

为了研究竖向荷载作用下支座内部橡胶的应变和钢板的应力分布,绘制了厚层橡胶支座不同压应力下的橡胶名义应变云图及钢板Von Mises应力云图(图3)。

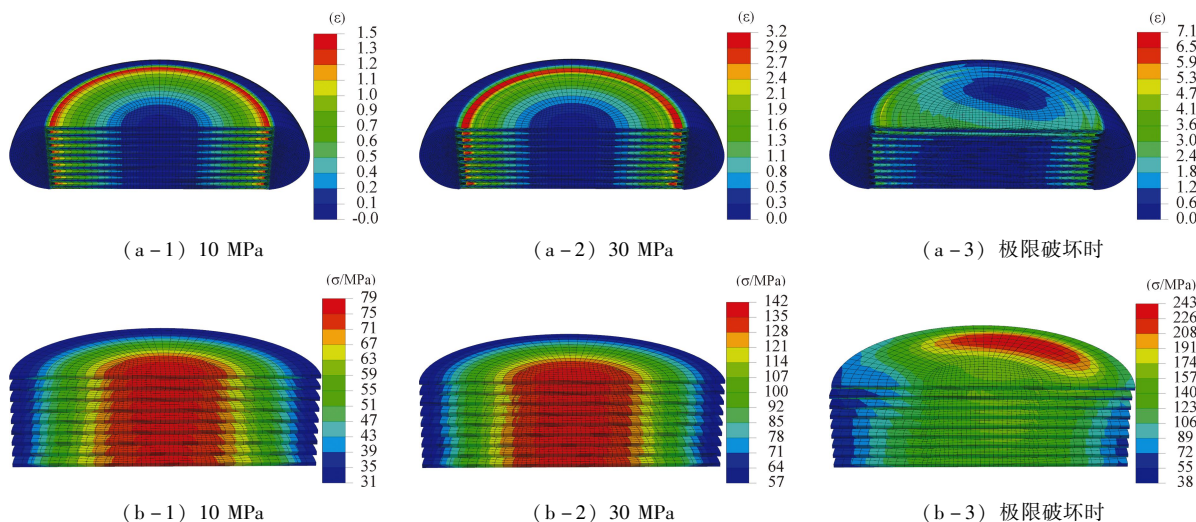


图3 厚层约束支座( $S_1=9$ )橡胶的名义应变(a)及加劲板的Von Mises应力(b)

Fig. 3 Nominal strain of the rubber bearings (a) and Von Mises stress of stiffening plate (b) of the thick-layer restrained bearing ( $S_1=9$ )

由于支座内部叠层钢板对橡胶层的侧向变形限制,支座中橡胶的应变由圆心到周边逐渐增加。由图3a可知,在竖向荷载作用下,厚层橡胶支座内的橡胶材料会发生侧向膨胀。当支座的竖向压应力为33 MPa时,厚层橡胶支座内橡胶的最大名义应变达到700%,支座发生失稳破坏。

主要由于支座的橡胶层厚度较大,第一形状系数 $S_1=9$ ,在竖向荷载作用下支座的加劲钢板尚未达到抗拉强度,支座容易发生失稳破坏。由图3b可知,在平均竖向压应力10、30 MPa作用下,支座内部钢板的Von Mises应力分布呈现同心圆状态分布,钢板圆心处应力最大;当支座达到极限

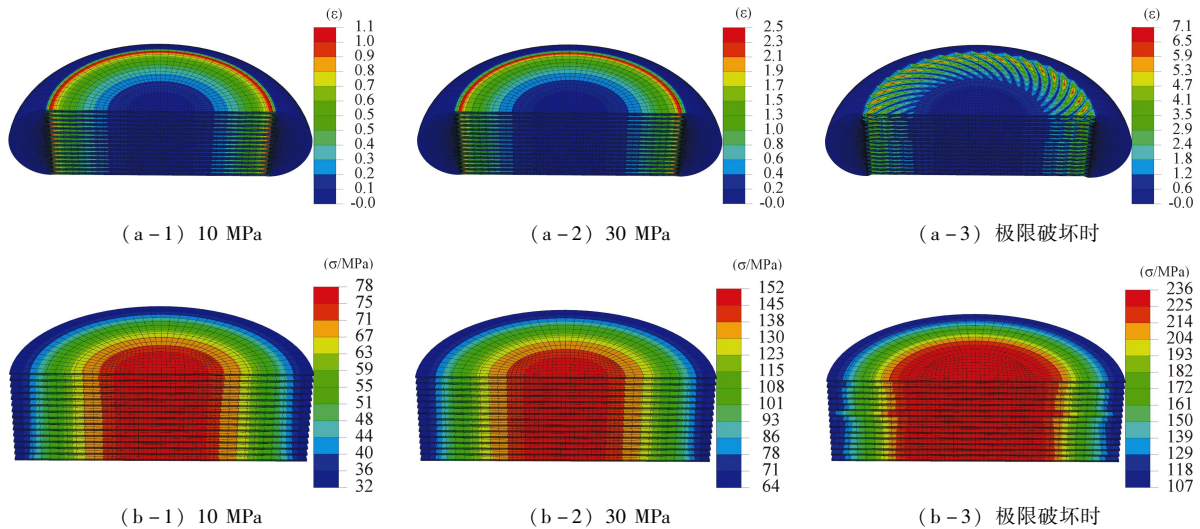


图4 无约束支座 ( $S_1=15$ ) 中橡胶的名义应变 (a) 及加劲板的 Von Mises 应力 (b)

Fig. 4 Nominal strain of the unconfined rubber bearings (a) and Von Mises stress of reinforcement (b) of the unconfined bearings ( $S_1=15$ )

破坏状态时, 支座偏向一侧, 发生失稳破坏, 导致应力分布不均。

图4分别为不同竖向荷载作用下, 无约束支座 ( $S_1=15$ ) 中橡胶的名义应变及钢板 Von Mises 应力情况。由于  $S_1$  的增大, 内部加劲钢板层数增加,

在竖向荷载作用下内部钢板限制橡胶横向变形的能力增强。在竖向极限荷载作用下, 支座发生材料强度破坏, 此时橡胶材料最大名义应变超过700%, 内部钢板 Von Mises 应力略微超过屈服应力。

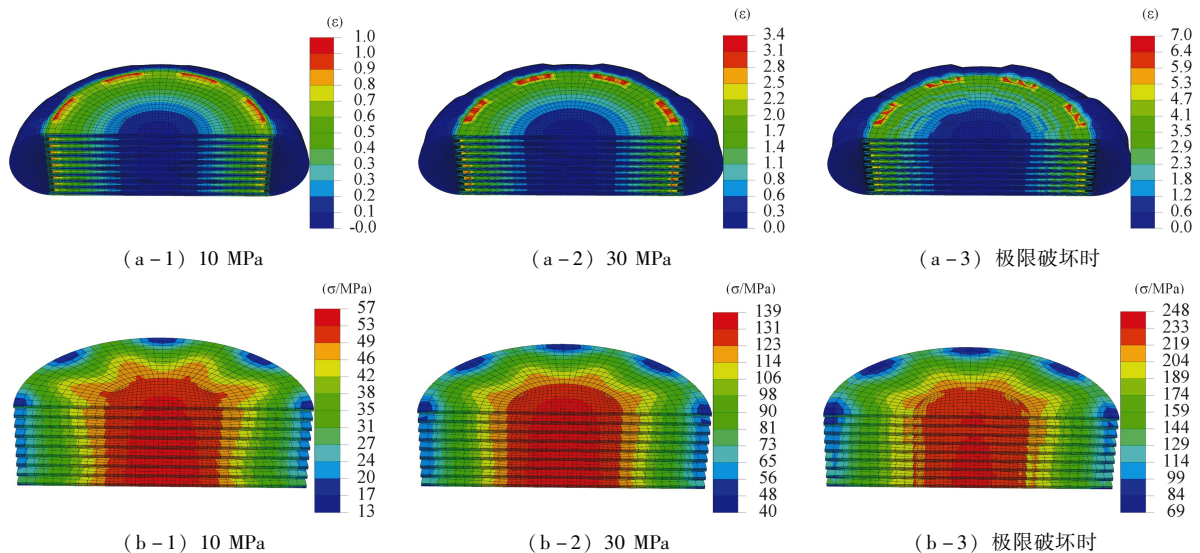


图5 约束支座 ( $S_1=9$ ) 中橡胶的名义应变 (a) 及加劲板的 Von Mises 应力 (b)

Fig. 5 Nominal strain of the confined rubber bearings (a) and Von Mises stress (b) of reinforcement of the confined bearings ( $S_1=9$ )

图5为在不同竖向荷载作用下, 约束橡胶支座中橡胶的名义应变云图及钢板的 Von Mises 应力云图。在竖向荷载作用下, 由于受条形外部约束和内部加劲钢板的共同约束作用, 约束橡胶支座的

侧向变形小于相同  $S_1$  的厚层橡胶支座。支座内橡胶最大名义应变达到700%时, 加劲板的应力也接近其屈服应力。在竖向极限荷载作用下, 条形外部约束有效避免了橡胶支座发生失稳破坏, 提高



了支座的承载能力。图6为约束橡胶支座破坏时约束板的应力分布情况。由于在模拟时条形外部约束和封板间被设置为固接,上下边缘出现局部的应力集中现象,但仍然未超过钢材的抗拉强度标准值。

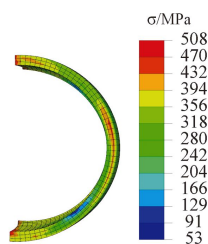


图6 支座破坏时约束板的 Von Mises 应力  
Fig. 6 Von Mises stress of the confined plate when the bearing is broken

对竖向加载作用下3种橡胶隔震支座进行模拟分析,得到厚层橡胶支座( $S_1=9$ )、约束橡胶支座( $S_1=9$ )和普通叠层橡胶支座( $S_1=15$ )竖向荷载-位移曲线,如图7所示,其竖向刚度分别为217 kN/mm、228 kN/mm和320 kN/mm。普通叠层橡胶支座竖向刚度显著高于其它2种橡胶支座。当支座橡胶的最大名义应变超过700%,或者加劲钢板和约束板的 Von Mises 应力达到钢材的屈服应力时,认为支座达到竖向承载能力的极限状态。此时,约束橡胶支座和普通叠层橡胶支座的竖向承载力基本一致,分别为56.7 MPa和56 MPa,远大于未约束厚层橡胶支座的竖向承载力33 MPa。

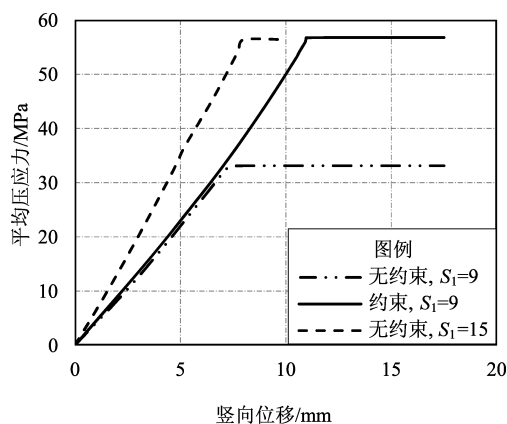


图7 3种橡胶隔震支座的竖向荷载-位移曲线图  
Fig. 7 Vertical load-displacement curves of three kinds of rubber bearings

### 3.2 影响因素分析

为研究对支座竖向力学性能的影响,先保持总高度不变,支座加劲钢板分别取3、6、9、12和15层,当竖向压应力为5 MPa时,对支座进行非线性有限元模拟,研究支座的竖向力学特性。图8a为不同条件下约束橡胶支座和无约束橡胶支座的竖向刚度比较。由图可知,条形外部约束对隔震橡胶支座竖向刚度的增加影响较小,同时随着 $S_1$ 增加,条形外部约束对橡胶支座竖向刚度的影响逐渐降低,当 $S_1=15$ 时条形外部约束对支座竖向刚度的增加低于5%。图8b为不同 $S_1$ 条件时是否考虑条形外部约束情况下橡胶支座的竖向承载力。与普通无约束的底层橡胶支座相比,约束橡胶支座竖向承载力增加25%~50%,因此可以显著提高橡胶支座竖向承载力。

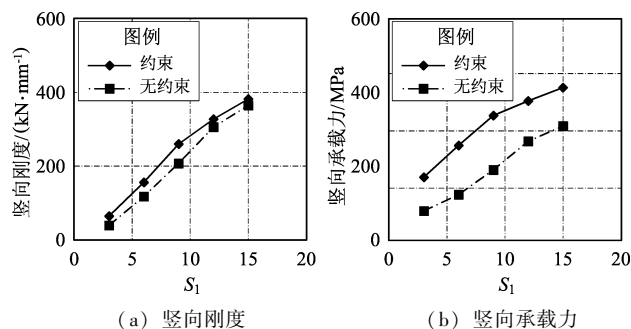


图8 支座的竖向力学性能

Fig. 8 Vertical mechanical properties of the bearings

## 4 结论

本文采用非线性有限元方法建立约束和无约束橡胶隔震支座的数值分析模型。通过竖向单调加载模拟,研究条形外部约束对橡胶支座竖向力学性能的影响,以及在此过程中橡胶层、钢板和条形外部约束的应力和应变情况,主要得到以下结论:

(1) 在较大荷载作用下,厚层叠层橡胶隔震支座易于发生整体失稳破坏,从而导致支座极限承载能力降低。约束橡胶支座能够通过外部约束限制竖向荷载作用下支座内橡胶层的侧向变形,提高支座的整体稳定性,防止支座发生整体失稳破坏,从而有效提高橡胶支座的竖向承载能力。

(2) 当橡胶隔震支座 $S_1$ 较小时,条形外部约

束对橡胶隔震支座的竖向刚度并未产生显著影响。随着支座的  $S_1$  增加, 条形外部约束对叠层橡胶隔震支座竖向刚度的影响逐渐降低。此时, 橡胶隔震支座保持较低的竖向刚度。

(3) 采用条形外部约束改进叠层橡胶隔震支座可以满足结构工程竖向减震(振)对于隔震装置低刚度和高承载力的需求。

### 参考文献:

- 何文福, 刘文光, 杨彦飞, 等. 2011. 厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 12(3): 258–263.
- 李吉超, 尚庆学, 罗清宇, 等. 2019. 厚层橡胶支座的力学性能试验研究[J]. 振动与冲击, 38(9): 157–165.
- 王伟, 邓涛, 赵树高. 2004. 橡胶 Mooney–Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, (4): 8–10.
- 吴迪, 沈朝勇, 熊焱, 等. 2020a. 三维基础隔震(振)技术与装置研究简述[J]. 华南地震, 40(4): 101–109.
- 吴迪, 熊焱, 崔杰. 2020b. 具有抗拔、限位、阻尼功能的三维隔震支座: 中国, CN210117820U[P]. 2020–02–28.
- 徐永秋, 刘文光. 2008. 厚层橡胶隔震支座的竖向力学性能与试验分

- 析[J]. 浙江建筑, (6): 30–32.
- 周颖, 陈鹏, 陆道渊, 等. 2016. 地铁上盖多塔楼隔震与减振设计研究[J]. 土木工程学报, (S1): 89–94.
- 朱玉华, 艾方亮, 任祥香, 等. 2018. 厚层铅芯橡胶支座力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 46(9): 1189–1194, 1233.
- 邹立华, 饶宇, 黄凯, 等. 2013. 预应力厚层橡胶支座隔震性能研究[J]. 建筑结构学报, 34(2): 76–82.
- European Committee for Standardization, EN1337–3—2005, Structural Bearings – Part3: Elastomeric Bearings[S].
- Mooney M. 1940. A theory of large elastic deformation[J]. Journal of Applied Physics, 11(9): 582.
- Rivlin R. S. 1948. Large elastic deformations of isotropic materials. I. Fundamental concepts[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 240(822).
- Tajirian F F, Kelly J M, Aiken I D. 1990. Seismic isolation for advanced nuclear power stations[J]. Earthquake Spectra, 6(2): 371–401.
- Warn G P, Vu B. 2012. Exploring the low shape factor concept to achieve three – dimensional seismic isolation[C]//20th analysis and computation specialty conference. Chicago, 1–11.
- EN1337–3—2005, 结构支座——第三部分: 橡胶支座[S].
- GB 50017—2017, 钢结构设计标准[S].
- GB/T 20688. 3—2006, 橡胶支座第3部分: 建筑隔震橡胶支座[S].

## The Finite Element Analysis of the Vertical Mechanical Properties of the Confined Rubber Bearings

WU Di<sup>1</sup>, QIU Shiyi<sup>2</sup>, XIONG Yan<sup>3</sup>

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510405, Guangdong, China)

(2. Guangzhou Pearl River Foreign Investment Architectural Design Institute Co. Ltd., Guangzhou 510060, Guangdong, China)

(3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Tech., Guangzhou 510640, Guangdong, China)

### Abstract

The vertical mechanical properties of a new type of confined seismic isolation rubber bearings are studied, and the rubber bearings are analyzed by using the finite element method. Through the numerical simulation of the vertical monotonic loading, the vertical mechanical properties and ultimate bearing capacity of the rubber bearings under the action of the vertical load are analyzed. In addition, the effects of different shape factors on the vertical mechanical properties of the rubber bearings are studied. The results show that compared with the traditional laminated rubber bearings, the confined rubber bearings have lower vertical stiffness, while still possessing higher vertical bearing capacity, can effectively improve the damping capacity of the isolation device in vertical direction.

**Keywords:** confined rubber bearings; vertical stiffness; bearing capacity; mechanical properties; the finite element analysis