

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.04.013

不同边界约束对橡胶支座受力性能影响研究

吴刚¹, 王克海^{2,3}, 张盼盼², 鲁冠亚^{2,3}

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;
3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 橡胶支座是连接桥梁上下部结构的重要构件, 其力学性能对上下部结构地震响应有重要影响, 但其力学性能会因安装时采用的锚固边界条件的不同而存在差异。为研究不同边界约束对橡胶支座受力性能的影响, 利用有限元软件建立了顶底面锚固、顶面锚固和顶底面均不锚固(无锚固)3种不同边界约束的精细化橡胶支座有限元模型, 并通过试验及理论计算验证了所建有限元模型的合理性。随后对具有不同边界约束的支座有限元模型施加竖向力及剪切变形, 对比分析了不同边界约束对支座内部应力分布、应力响应值变化等力学性能的影响。结果表明, 随剪切变形的增加, 支座因受压面积减小而导致内部峰值压应力逐渐增加, 不同边界约束下支座的内部峰值压应力增加幅值相差明显, 其中采用顶底面锚固的支座增加幅值最大, 无锚固边界支座增加幅值最小; 在剪切变形作用下, 对橡胶支座采取锚固措施会增加支座内部应力响应值, 相同水平荷载下, 顶底面锚固支座比无锚固支座更易发生橡胶层与钢板间的剥离、撕裂破坏, 而且采取顶底面锚固边界约束会增大桥梁结构下部地震力, 不利于结构抗震; 对于采用无锚固边界约束的支座, 随剪切变形的增加, 其刚度退化明显, 在设计时应考虑因支座支承面处卷曲而造成的有效剪切面减小的影响。

关键词: 桥梁工程; 受力性能; 有限元分析; 橡胶支座; 剪切变形; 压应力分布

中图分类号: U442.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)04-0088-07

Study on Mechanical Property of Rubber Bearings for Different Boundary Conditions

WU Gang¹, WANG Ke-hai^{2,3}, ZHANG Pan-pan², LU Guan-ya^{2,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: As an important component connecting the superstructure and the substructure of bridge, the mechanical property of rubber bearings has an important influence on the seismic response of the superstructure and the substructure, but the mechanical property is different depending on the anchorage boundary conditions adopted in the installation. In order to investigate the influence of different boundary conditions on the mechanical property of rubber bearings, a group of refined FE models of the bearing, which considering anchoring at top and bottom surfaces, only anchoring at top surface and without any anchoring, are developed using finite software. The rationality of all the finite models is verified by comparing with the experimental result and theoretical result. Then, vertical stress and shear deformation are applied on the verified models, the influence of different boundary conditions on the mechanical property, such as inner stress distribution and stress response value, is comparatively analysed. The result shows that (1) The compressive area of bearings decrease as shear deformation increase, which lead to the internal peak compressive stress increase gradually. The obvious different increases of peak compressive stress depend on

收稿日期: 2017-05-18

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2009DFA82480); 交通运输部西部交通建设科技项目(2009318223094); 交通运输部公路工程行业标准项目(JTG-C-201012); 内蒙古自治区交通科技项目(NJ-2014-20)

作者简介: 吴刚(1988-), 男, 江西高安人, 博士研究生. (wugang523@126.com)

the boundary condition. The bearing with anchoring at top and bottom surfaces increases the maximum amplitude, while the bearing without any anchoring increases the minimum amplitude value. (2) The internal stress value of bearings will be increased with anchoring application under shear deformation. The bearing with anchoring at top and bottom surfaces is more prone to peel and tear damage between rubber layer and steel plate than that without any anchoring under the same horizontal load, and the seismic force transferred to the substructure of bridge will be increased with anchoring application, which is not good for seismic performance of bridge. (3) For the bearing without any anchoring, the stiffness will be degraded as shear deformation increase. It is recommended that the decrease of effective shear area of bearings caused by roll-off at the supporting surfaces should be taken into consideration during bridge design stage.

Key words: bridge engineering; mechanical property; finite element analysis; rubber bearing; shear deformation; compressive stress distribution

0 引言

中小跨径梁桥中,橡胶支座可较好传递上部结构作用力及适应结构变形,是重要的连接构件,其受力性能主要受顶、底面约束边界影响。实际工程中,橡胶支座主要有2种安装形式:不设置顶底钢板,直接放置在上、下部结构之间,即无锚固形式UB支座;通过设置顶底钢板将支座与结构锚固,即顶底面锚固形式BB支座。其中,UB橡胶支座是普遍采用的支座形式,由于顶底面均不与结构锚固,地震作用下,该类支座在顶底接触面处易产生滑动,其震害主要表现为翻滚卷曲、支座移位及支座脱空^[1],UB橡胶支座的易于滑动特性在一定程度上保护了下部结构,可作为“保险丝式”单元设计^[2-3]。但UB橡胶支座的显著滑动也会增大上部结构位移,造成碰撞、落梁等震害。对此,王东升等^[1,4]建议采用顶底面均锚固形式BB支座或单面锚固形式SB支座(顶面或底面设置钢板与结构锚固)以减小墩梁相对位移或提供相对稳定滑动面。然而,采取锚固与不锚固措施将引起支座受力特性上的差异,本研究将对顶底面锚固、顶面锚固和无锚固3种不同边界约束条件对橡胶支座受力性能的影响进行分析。

由于橡胶支座具有较好的传力及变形能力,且在地震作用下,其滞回特性还能起到一定耗能及隔震作用,Cardone等^[5-8]对BB橡胶支座的稳定性、隔震功能等进行研究,并建立力学模型。对于UB橡胶支座,既有研究主要是关注其摩擦滑移特性及其滑动对桥梁地震响应的影响^[9-16],相关试验研究也多是基于单面锚固形式支座^[12-15],而对支座采取锚固措施会影响其内部应力分布及荷载响应,并不能反映UB橡胶支座真实受力及变形。目前尚少有文献对比分析不同边界约束对橡胶支座内部应力分布特

征、应力响应值等受力性能的影响。

论文基于对橡胶支座摩擦滑移抗震性能试验研究,进一步借助有限元方法,通过改变支座顶底面边界约束条件,建立了3种不同边界约束的橡胶支座模型。在此基础上,对比分析相同荷载水平下具有不同边界约束的橡胶支座内部应力分布特征、应力响应值变化等力学性能。

1 橡胶支座受力特性

1.1 竖向纯压应力作用下支座压应力分布

竖向压力作用下,由于支座顶底支承面及内部钢夹片对橡胶层的横向变形具有一定的约束,使得支座内部应力并非均匀分布,而是沿宽度方向呈抛物线分布。Konstantinidis等^[16]通过对纯压应力作用下的方形橡胶板进行数值分析,提出了橡胶层内部压应力随宽度分布的计算公式:

$$\sigma(x) = P \frac{1 - \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda b)}}{1 - \frac{\tanh(\lambda b)}{\lambda b}}, \quad (1)$$

$$\lambda^2 = 12G/t^2\kappa, \quad (2)$$

式中, P 为竖向压应力; b 为支座宽; G 为支座剪切模量; t 为单层橡胶厚度; κ 为橡胶体积模量。

1.2 水平剪切刚度及承载力

对于橡胶支座,其力学特性计算通常基于线弹性假设,水平承载力和水平剪切刚度计算式如下:

$$F_s = K_H \Delta, \quad (3)$$

$$K_H = \frac{GA}{t_r}, \quad (4)$$

式中, G 为支座剪切模量; A 为支座截面面积; t_r 为橡胶层总厚度; K_H 为支座水平刚度; Δ 为支座水平剪切变形。

而对于UB橡胶支座,上述计算式并没有考虑无

锚固边界下有效剪切面积减小对支座力学性能的影响。实际工程中,在水平荷载作用下,UB 橡胶支座顶底面处往往因受拉而与支承面脱离,发生翘曲,如图 1 所示,随剪切变形的增大,翘曲现象越明显,支座有效剪切面积不断减小,致使水平承载力和水平刚度下降,直至支座发生滑移或翻滚。文献 [16] 考虑了支座有效剪切面变化,并对式 (3) 进行修正,对于宽为 $2b$ 的 UB 橡胶支座,其水平承载力和水平剪切刚度计算如下:

$$F_s = \frac{Gw\Delta}{t_r}(2b - \Delta) = GA\gamma(1 - \alpha\gamma), \quad (5)$$

$$K_H = \frac{dF_s}{d\Delta} = \frac{GA}{t_r}(1 - 2\alpha\gamma), \quad (6)$$

式中, Δ 为支座剪切变形; w 为与 b 垂直方向宽度; γ 为水平剪应变, $\gamma = \frac{\Delta}{t_r}$; α 为支座橡胶高度与宽度之比, $\alpha = \frac{t_r}{2b}$; 其余参数同前。

1.3 不同边界约束形式支座受力特点

结构中的橡胶支座用于传递竖向荷载和水平荷载,但对于不同边界约束条件下的支座,其受力特性存在明显差异,这在设计中易被忽略。对于顶底面均无锚固的支座,其所受竖向压应力仍由支座顶底面重叠区域承担,但在水平剪切变形作用下,支承面处因无约束而产生翘曲现象,不会出现拉应力。竖向力与剪力形成的力偶相互平衡,而不会形成不平衡力偶,受力特性如图 1 所示。

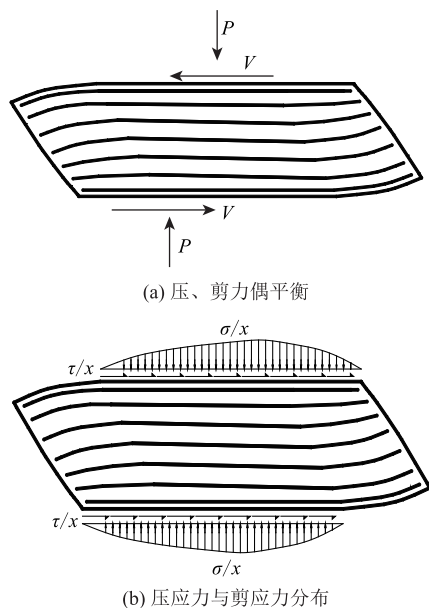


图 1 UB 橡胶支座受力及变形特性

Fig. 1 Forces and deformation of UB rubber bearing

对于顶底面均锚固的支座,其所受竖向压应力由顶底面的重叠区域承担,在水平荷载作用下支座将形成不平衡力偶,致使部分区域将产生拉应力以平衡该力偶,如图 2 所示三角区域。拉应力的产生也增大了橡胶与钢夹片间的剥离力,易使橡胶支座产生撕裂破坏。

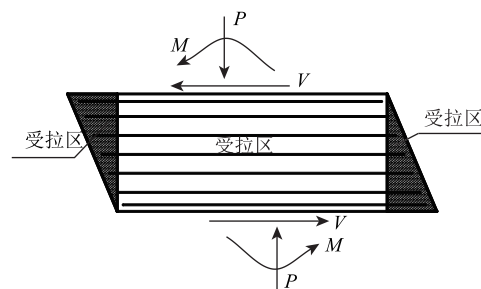


图 2 BB 橡胶支座受力及变形特性

Fig. 2 Forces and deformation of BB rubber bearing

对于单面锚固支座,锚固面附近因剪切变形而产生拉应力,未锚固面处则出现支座翘曲现象。其力学特性介于顶底面锚固形式与无锚固形式支座之间,如图 3 所示。

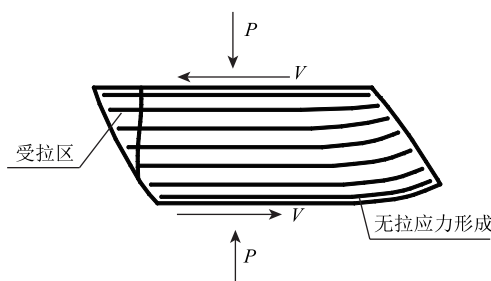


图 3 SB 橡胶支座受力及变形特性

Fig. 3 Force and deformation of SB rubber bearing

2 分析模型

2.1 有限元模型建立

李冲等通过对不同压应力下的 SB 橡胶支座试件进行试验来研究橡胶支座的摩擦滑移抗震性能,并得到水平力-位移滞回曲线等支座受力性能^[14]。本研究以其中竖向压应力为 8 MPa 的 S3 试件为例,试验过程中仅采取顶面锚固边界约束形式。橡胶支座试验模型如图 4 (a) 所示,支座参数见表 1。

表 1 SB 橡胶支座试件参数

Tab. 1 Parameters of SB rubber bearing specimen

序号	支座 型号	橡胶总 厚度/mm	形状 系数	单层橡 胶厚 t/mm	竖向 荷载/MPa
S3	GJZ 500 × 550 × 78	48	13.4	10	8

采用有限元软件建立不同约束边界有限元模型进行分析。与钢筋、混凝土等小变形材料不同,橡胶具有较低的剪切模量。在荷载作用下会发生大变形,但其体积几乎是不可压缩的^[16-17],在有限元模型中,需通过定义超弹性材料和杂交(Hybrid)单元来模拟橡胶,这可以较好地解决橡胶材料的体积自锁问题,并采用2D平面应变模型来模拟支座受力反应。对于未锚固边界约束的接触问题,采用库仑摩擦模型进行处理,而锚固边界约束处接触及支座钢板与橡胶之间均采用绑定(tie)约束^[18]。该SB橡胶支座有限元模型如图4(b)所示。其他边界约束条件下支座的计算模型是在SB橡胶支座的基础上改变约束边界,并保证材料、加载等方式均不变。

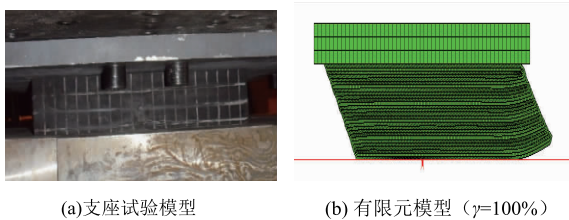


图4 SB橡胶支座试件及有限元模型

Fig. 4 SB rubber bearing specimen and Finite element model

2.2 模型验证

(1) SB橡胶支座有限元模型验证

图5为SB橡胶支座有限元计算结果与试验水平力-位移滞回曲线对比图。由图5可知,两者结果比较吻合,表明该有限元模型能很好反映竖向及水平荷载作用下SB橡胶支座受力特性。

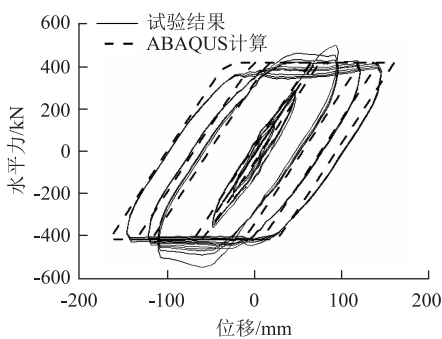


图5 水平力-位移滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison of curves of horizontal force vs. displacement hysteresis

(2) BB橡胶支座模型验证

顶底面锚固边界约束支座的计算模型是对顶、底面处边界均采用绑定约束模拟。取有限元模型中间层橡胶单元(后面应力分析中也为该橡胶层)的竖向压应力与式(1)计算结果对比,如图6所示

(规定图中压应力为正,无特殊说明,其余图中规定一样),有限元计算结果与理论计算分布规律基本一致。同时,表2对比了有限元模型水平剪切刚度值与理论值,两者结果相近。由图6和表2,说明该有限元模型能较好地反映竖向及水平荷载作用下BB橡胶支座受力特性。

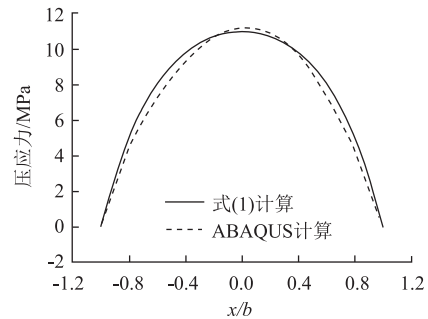


图6 $P=8$ MPa, 支座压应力随宽度的分布

Fig. 6 Distribution of compressive stress of bearing along width when $P=8$ MPa

表2 水平刚度值对比

Tab. 2 Comparison between horizontal stiffnesses

锚固形式	支座水平刚度/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)		误差/%
	理论值(式4)	有限元结果	
顶底面锚固	6 875	6 463	5.99

(3) UB橡胶支座模型验证

UB橡胶支座模型采用库仑摩擦模型来模拟支座顶底面与支承面的接触。不同剪应变下水平荷载理论值与有限元计算结果如表3所示,结果比较吻合,说明该有限元模型合理。

表3 不同剪应变下水平荷载对比

Tab. 3 Comparison of horizontal loads under different shear strains

对比项	水平荷载/kN		
	$\gamma=50\%$	$\gamma=100\%$	$\gamma=144\%$
式(5)计算	157.08	298.32	398.90
有限元模型	152.96	284.11	389.32

注:在达到144%剪应变时,支座开始产生滑移。

3 边界约束影响分析

3.1 支座压应力分布

由1.3节可知,相同压应力及剪切变形作用下,不同约束边界对橡胶支座受力特性有较明显的影响,如图1~图3所示。为进一步对比分析,对3种边界约束支座模型施加相同荷载。图7为顶底面锚固约束边界支座BB橡胶支座中间橡胶层在50%和150%

剪应变时的压应力分布情况。可以看出,随水平位移增加,顶底面锚固支座的受压区域减小,但峰值应力增加了12.1%。对于单面锚固和无锚固情况,也可发现相同规律,但是峰值应力增加较小,分别为3.3%和2.7%,限于篇幅,此处未列出后2种情况的压应力分布对比图。

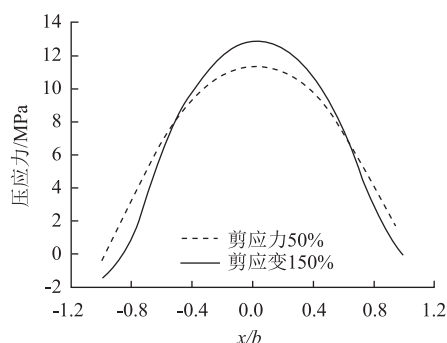


图7 不同剪应变下 BB 橡胶支座压应力分布

Fig. 7 Distribution of compressive stresses of BB rubber bearing under different shear strains

图8为3种边界约束条件下所取中间橡胶层峰值压应力随剪应变的变化趋势。显然,对于BB橡胶支座,其峰值应力随剪应变变化明显,且均大于其他2种情况,特别是在200%剪应变时,峰值压应力较SB橡胶支座大22.4%,比UB橡胶支座大25.7%。对于SB橡胶支座和UB橡胶支座,随剪应变的增加,其峰值压应力增加的幅值相对平缓,尤其是UB橡胶支座,其峰值压应力最大增幅为3.9%。SB橡胶支座和UB橡胶支座峰值压应力变化曲线在一定剪应变时出现小平台,这是由于支座产生了滑动,支座表现为刚体运动,内部应力保持恒定。

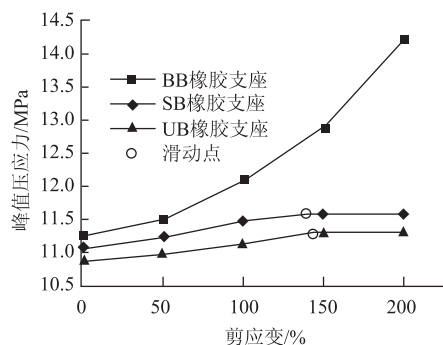


图8 不同约束边界条件下中间橡胶层峰值压应力变化

Fig. 8 Distribution of peak compressive stresses of middle rubber layer under different boundary conditions

3.2 支座内部钢板应力分析

图9为不同约束条件下支座底部第2块钢板的

峰值拉应力随剪应变的变化曲线。可以看出,顶底面锚固情况下钢板所受峰值拉应力在剪应变超过100%后显著增加,而单面锚固和无锚固情况下,由于支座的卷曲及滑移,钢板峰值拉应力无明显增幅。这说明在相同荷载水平下,顶底面锚固条件下的支座对橡胶层与钢板间黏结力的需求要明显大于其他锚固边界约束情况,这对支座的制作提出了更高要求。

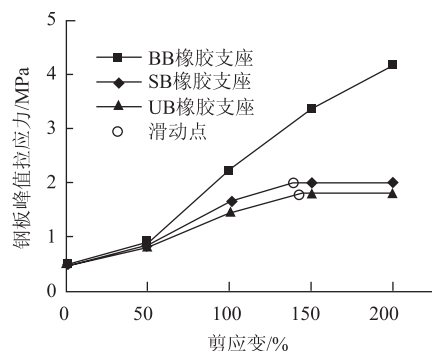


图9 不同约束边界条件下钢板的峰值拉应力

Fig. 9 Peak tensile stresses of steel plate under different boundary conditions

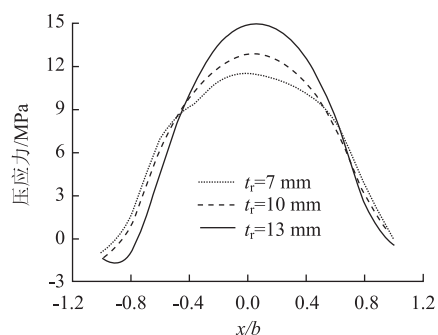
3.3 对几何参数不同的支座压应力分布影响

为进一步说明边界约束条件对橡胶支座的受力特性的影响,基于前述分析的3种边界约束支座有限元模型,改变支座模型橡胶层厚度,选取单层橡胶层厚度 t 分别为7, 10, 12 mm 3种类型橡胶支座进行分析。

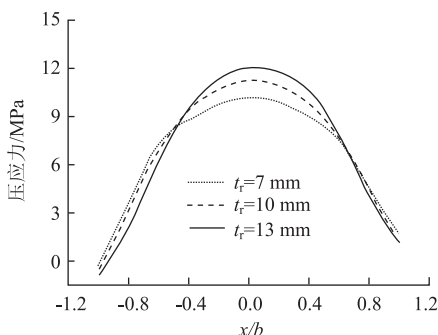
图10为不同橡胶层厚度的BB橡胶支座和UB橡胶支座在150%剪应变时压应力分布。可以看出,相同剪应变作用下,橡胶层厚度越大,橡胶支座受压面积越小,压应力越集中,峰值压应力也越大。由图11中峰值压应力变化趋势中可以得到,当单层橡胶层厚度由7 mm增加到13 mm时,BB橡胶支座、SB橡胶支座和UB橡胶支座的峰值压应力分别增加了29.6%, 22.4%和18.2%,说明随支座橡胶层厚度增加,支座更容易发生失稳,对于UB橡胶支座,还可能产生翻滚破坏。同时可发现,随橡胶层厚度增加,不同约束边界对橡胶支座受力影响程度增加。单层橡胶层厚度为7 mm时,BB橡胶支座,SB橡胶支座和UB橡胶支座的峰值压应力比值为1.13:1.05:1,当单层橡胶层厚度为13 mm时,该比值为1.24:1.09:1。由此,边界约束条件对支座受力影响较大,在支座选用及使用时,应考虑其边界约束的影响。

3.4 对支座水平力及水平刚度的影响

如1.3节所述,当支座顶底面与结构支承面不



(a) BB橡胶支座



(b) UB橡胶支座

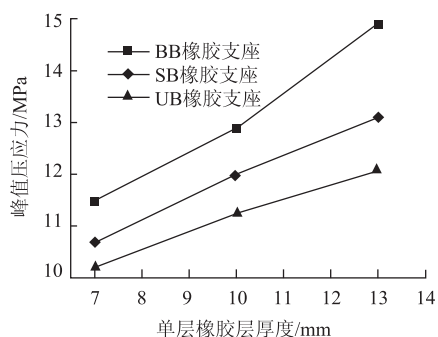
图10 不同橡胶厚度支座压应力分布 ($\gamma = 150\%$)Fig. 10 Distribution of compressive stresses of bearing with different rubber thicknesses ($\gamma = 150\%$)

图11 不同工况下支座峰值压应力变化

Fig. 11 Changes of peak compressive stress of bearing in different cases

锚固时,在水平荷载作用下,支座不锚固面角点将发生翘曲,导致有效剪切面下降,从而影响支座水平承载力及水平刚度值。图12列出了单层橡胶层厚度10 mm时3种不同边界约束形式支座的水平力-位移关系。在水平位移小于32.5 mm (剪应变67.7%)时,3种边界约束条件下支座水平力-位移关系基本一致。随水平位移增加,UB橡胶支座首先出现翘曲,有效剪切面逐渐减小,其刚度及水平力均小于其他边界约束支座。水平位移增加至37.2 mm (剪应变77.5%)时,SB橡胶支座在底部未锚固面

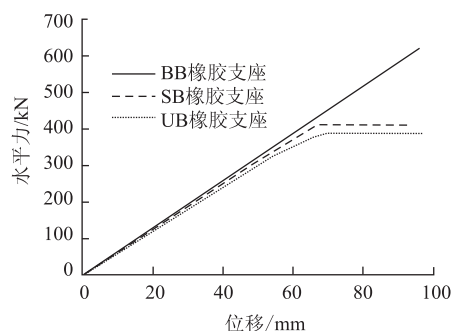


图12 不同边界约束支座水平力-位移关系

Fig. 12 Horizontal force vs. displacement of bearing under different boundary conditions

处也出现翘曲,但不及UB橡胶支座明显。在66.82 mm (剪应变139.2%)水平位移时,SB橡胶支座最先发生滑移,最大水平力为412.44 kN,此时水平刚度为6.17 kN/mm,下降了4.5%。而UB橡胶支座在69.12 mm (剪应变144%)处才发生滑移,最大水平力为389.32 kN,比SB橡胶支座最大水平力小5.6%,此时UB橡胶支座水平刚度值为5.63 kN/mm。由此说明,支座边界约束对橡胶支座力学性能影响较大,采用顶底面锚固边界约束会增大传至下部结构作用力,而且支座本身也易被撕裂,但可以较好限制桥梁上部结构位移,在中小震设防区域桥梁中可发挥较好限位作用。对于SB橡胶支座及UB橡胶支座,在不锚固边界约束面处会发生滑移,起到一定隔震作用,但在设计中应考虑因翘曲而造成有效剪切面积减小,防止支座出现翻滚卷曲的震害。

4 结论

(1) 随剪应变的增加,橡胶支座受压面积减小,而峰值压应力逐渐增加。但不同边界约束条件的支座峰值压应力增加幅值不同,采用顶底面锚固的支座增加幅值最大,无锚固边界支座增加幅值最小。

(2) 对橡胶支座采取锚固措施,将会增加支座内部应力响应值。相同水平荷载下,顶底面锚固支座比无锚固支座更易发生橡胶层与钢板间的剥离、撕裂破坏。

(3) 随橡胶层厚度的增加,边界约束条件对橡胶支座受力特性影响更明显,支座更易发生失稳,对无锚固支座还可能发生翻滚卷曲破坏。

(4) 不同约束边界条件对支座受力影响较大,采取顶底面锚固边界约束会增大传至下部结构作用力,且易造成支座撕裂,而对于无锚固边界约束的支座易发生滑移,起到一定隔震作用。

参考文献:

References:

- [1] 庄卫林, 陈乐生. 汶川地震公路震害分析—桥梁与隧道 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
ZHUANG Wei-lin, CHEN Le-sheng. Analysis of Highways' Damage in the Wenchuan Earthquake: Bridge and Tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 王克海, 韦韩, 李茜, 等. 中小跨径公路桥梁抗震设计理念 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (9): 115—121.
WANG Ke-hai, WEI Han, LI Qian, et al. Philosophies on Seismic Design of Highway Bridges of Small or Medium Spans [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (9): 115—121.
- [3] 王克海, 李冲, 李茜, 等. 考虑支座摩擦滑移的中小跨径桥梁抗震设计方法 [J]. 工程力学, 2014, 31 (6): 85—92.
WANG Ke-hai, LI Chong, LI Qian, et al. Seismic Design Method of Small and Medium Span Bridge Considering Bearing Friction Slipping [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (6): 85—92.
- [4] 王东升, 孙治国, 郭迅. 汶川地震桥梁震害经验及抗震研究若干新进展 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (10): 44—53.
WANG Dong-sheng, SUN Zhi-guo, GUO Xun. Lessons Learned from Wenchuan Seismic Damages and Recent Research on Seismic Design of Highway Bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (10): 44—53.
- [5] CARDONE D, PERRONE G. Critical Load of Slender Elastomeric Seismic Isolators: An Experimental Perspective [J]. Engineering Structures, 2012, 40 (7): 198—204.
- [6] JAIN S K, THAKKAR S K. Experimental Investigations on Laminated Rubber Bearings [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2005, 3 (1): 129—136.
- [7] WARN G P, WEISMAN J. Parametric Finite Element Investigation of the Critical Load Capacity of Elastomeric Strip Bearings [J]. Engineering Structures, 2011, 33 (12): 3509—3515.
- [8] GJORGJIEV I, GAREVSKI M. A Polynomial Analytical Model of Rubber Bearings Based on Series of Tests [J]. Engineering Structures, 2013, 56 (6): 600—609.
- [9] 聂利英, 李建中, 胡世德, 等. 地震作用下板式橡胶支座滑动引起的城市立交中的动力耦合作用 [J]. 工程力学, 2006, 23 (11): 14—20.
NIE Li-ying, LI Jian-zhong, HU Shi-de, et al. Dynamic Response Coupled by Rubber Bearing Sliding in Interchange Bridge under Earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (11): 14—20.
- [10] 王常峰, 陈兴冲. 竖向地震动对桥梁结构地震反应的影响 [J]. 振动与冲击, 2007, 26 (6): 31—35.
WANG Chang-feng, CHEN Xing-chong. Effect of Vertical Excitation on Seismic Performance of Continuous Bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26 (6): 31—35.
- [11] 王克海. 桥梁抗震研究 [M]. 2 版. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
WANG Ke-hai. Seismic Research of Bridge [M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [12] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, FILIPOV E T, et al. Shear and Friction Response of Nonseismic Laminated Elastomeric Bridge Bearings Subject to Seismic Demands [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18 (7): 612—623.
- [13] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, LAFAYE J M, et al. Seismic Response of Bearings for Quasi-isolated Bridges: Testing and Component Modeling [C] // 2011 Structures Congress. Las Vegas: ASCE, 2011: 164—178.
- [14] 李冲, 王克海, 李悦, 等. 板式橡胶支座摩擦滑移抗震性能试验研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44 (1): 162—167.
LI Chong, WANG Ke-hai, LI Yue, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Laminated Rubber Bearings with Friction Slipping [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44 (1): 162—167.
- [15] 项乃亮, 崔侠侠, 李建中. 板式橡胶支座滑动摩擦性能试验及其力学模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44 (12): 1828—1834.
XIANG Nai-liang, CUI Xia-xia, LI Jian-zhong. Experimental Study on Sliding Friction Behavior of Laminated Rubber Bearing and Its Mechanical Model [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2016, 44 (12): 1828—1834.
- [16] KONSTANTINIDIS D, KELLY J M, MAKRIS N. Experimental Investigations on the Seismic Response of Bridge Bearings, Report No. EERC 2008—02 [R]. Berkeley: University of California, 2008.
- [17] 庄军生. 桥梁支座 [M]. 3 版. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
ZHUANG Jun-sheng. Bridge Bearings [M]. 3rd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [18] 李枝军, 葛飞, 徐秀丽, 等. 板式橡胶支座性能有限元模拟与试验研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43 (6): 1299—1304.
LI Zhi-jun, GE Fei, XU Xiu-li, et al. Finite Element Simulation and Experimental Study of Property for Elastomeric Pad Bearing [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43 (6): 1299—1304.