

板式橡胶支座滑动摩擦性能试验及其力学模型

项乃亮, 崔侠侠, 李建中

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对汶川地震中小跨度梁桥出现的板式橡胶支座滑动的典型震害, 对板式支座与钢板间的滑动摩擦性能进行了试验研究, 分析了竖向正压力和滑动速率对支座滑动摩擦性能的影响规律, 试验结果表明, 在发生明显滑动之前, 支座以水平剪切变形为主, 伴随少量的相对滑动, 其名义剪切模量在 700~1 100 kPa 之间; 板式支座与钢板间的滑动摩擦系数与支座的竖向压应力呈负相关, 与滑动速率呈正相关。最后建立了考虑板式支座与钢板间滑动摩擦性能的精细化力学模型, 以考虑多种因素对支座滑动效应的影响。

关键词: 板式橡胶支座; 钢板; 滑动摩擦性能; 试验; 力学模型

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

Experimental Study on Sliding Friction Behavior of Laminated Rubber Bearing and Its Mechanical Model

XIANG Nailiang, CUI Xiaxia, LI Jianzhong

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the typical damage of laminated rubber bearing sliding for small to medium-span girder bridges during the Wenchuan Earthquake, experimental study on the sliding frictional behavior between bearing and steel plate was carried out. Effects of vertical stress and sliding velocity on the bearing sliding behavior were investigated. Results showed that the bearing displayed an approximately linear elastic shear response before sliding. The nominal shear modulus of the bearing ranged between 700 and 1 100 kPa. The coefficient of sliding friction at bearing-steel plate interface was negatively related to the vertical stress, and positively related to the sliding velocity. A mechanical model of the sliding behavior between laminated rubber bearing and steel plate was then developed, considering the effect of various

parameters.

Key words: laminated rubber bearing; steel plate; sliding friction behavior; experimental study; mechanical model

凭借其构造简单、性能可靠、安装方便、成本低廉等优点, 板式橡胶支座目前已成为国内中小跨度桥梁最为常见的一种支座形式, 它的主要功能是将上部结构的反力可靠地传递给墩台, 同时能适应梁体在正常使用状态下的变形^[1]。通常情况下, 板式橡胶支座一般放置在墩台垫石上, 梁体则直接搁置在支座之上, 支座与梁底钢板及垫石之间一般不做其他连接处理, 为了保证桥梁在地震作用下不发生落梁震害, 纵桥向通常设置一定的墩(台)梁搭接长度, 横桥向则采用混凝土抗震限位挡块。

2008年的汶川大地震使采用板式橡胶支座的中小跨度桥梁遭受了严重的震害, 通过对汶川地区地震烈度Ⅶ~Ⅺ度区域内受地震影响的1 068座中小跨度桥梁的震害调查发现^[2-3]: 板式橡胶支座桥梁典型震害特征为支座与梁底钢板间发生相对滑动, 从而导致梁体产生过大的位移, 横向与混凝土挡块碰撞、纵向挤压桥台和伸缩缝, 引起挡块、桥台及伸缩缝等的破坏, 甚至发生落梁震害, 但支座的滑动效应可以在一定程度上起隔震作用, 因此该类桥梁桥墩和基础的损伤程度相对较小。

国内外有学者对板式橡胶支座的滑动摩擦效应进行过相关研究, 黄小国^[4]对 GJZ450×400×85 mm 型矩形板式橡胶支座与钢板间滑动效应拟静力试验结果表明, 支座与钢板间摩擦系数在 0.17~0.38 之间, 随着竖向压力的增大而减小; 方圆^[5]对汶川震区寿江大桥上采用的 GJZ250×350×63 mm 型板式橡胶支座进行了足尺试验, 结果表明在位移较

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036302); 国家自然科学基金(51278371); 交通运输部建设科技项目(2013318800020)

第一作者: 项乃亮(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁结构抗震。E-mail: xiangnailiang@sina.com

通讯作者: 李建中(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构抗震。E-mail: lijianzh@tongji.edu.cn

小时,橡胶支座仅发生弹性剪切变形,当支座与钢板间发生相对滑动后,其滑动摩擦系数在 0.27 左右,且随正压力的增加而减小,随滑动速率的增加而增加;Steelman 等^[6]通过对板式橡胶与混凝土接触面滑动摩擦拟静力试验得出支座与混凝土间的滑动摩擦系数在 0.25~0.50 之间,且随着竖向压力、滑动速率及接触面粗糙程度等因素的变化而变化.以上成果大多偏重于对板式橡胶支座滑动摩擦现象的定性研究,并未系统建立支座滑动摩擦性能的精细化力学模型,以同时考虑多种因素对其摩擦性能的影响.

本文以我国 25 m 跨径标准简支梁桥上采用的 GYZ400×84 mm 型板式橡胶支座为例,对支座与钢板间的滑动摩擦效应进行足尺试验研究,分析竖向压应力和滑动速率对支座滑动摩擦性能的影响规律,在试验结果的基础上建立板式橡胶支座与钢板间滑动摩擦效应的精细化力学计算模型.

1 试验概要

1.1 试验设计与安装

整个试验系列共包括 4 只 GYZ400×84 mm 型圆形板式橡胶支座,编号分别为 1~4,支座橡胶层总厚度为 60 mm,设计最大承载力为 9.5 MPa,支座的加工制作参照《公路桥梁板式橡胶支座规格系列》^[7]的相关规定,该型号支座在我国 25 m 跨径标准简支 T 梁桥上较为常见.试验中支座采用单面锚固,通过上封板将支座顶面与试验加载设备进行可靠连接,连接采用若干 8.8 级高强螺栓,支座底面与普通钢板(钢板表面未进行任何处理)直接接触,形成橡胶与钢板间稳定的滑动摩擦面.在靠近支座底面处安装拉线式位移计,用于记录试验过程中支座自身剪切变形的变化,试件安装及试验布置如图 1 所示.

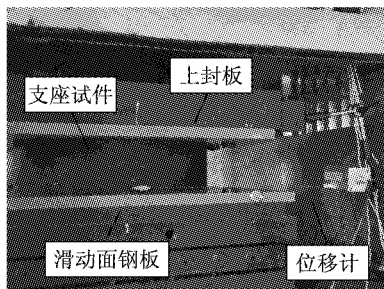


图 1 试件安装及试验布置

Fig.1 Specimen installation and test setup

1.2 加载方案

试验通过双向电伺服高性能试验机对支座试件

进行加载,试验机竖向作动器可施加最大 3 000 kN 的竖向压力,水平作动器可提供最大 500 kN 的推力,水平向最大行程为±200 mm,即作动器的水平向总位移量为 400 mm.试验过程中保持试件承受恒定的竖向压力以模拟正常使用状态下的支座恒载状态,利用水平作动器对试件进行水平向加载.试验的加载方案如表 1 所示,表中试验工况号(1-1,1-2,…)前面数字表征采用的试件编号,后面数字表征试验次序.采用一次单调和多次往复循环的位移加载方式,一次单调加载制度的最大加载位移为 240 mm,对应于 400% 支座橡胶层厚度.图 2 给出了往复循环加载的加载制度,共分为 4 级加载,每级最大加载位移分别为 30,60,120 和 180 mm,分别对应于 50%,100%,200%以及 300%的支座橡胶层厚度,每级位移对应 2 次加卸载循环.

表 1 试验方案

Tab.1 Testing matrix

工况	试件	加载制度	竖向正压力/ MPa	加载速率/ (mm, s ⁻¹)	最大加载 位移/mm
1-1	1	一次单调	2.0	0.5	240
1-2	1	一次单调	4.0	0.5	240
1-3	1	一次单调	6.0	0.5	240
1-4	1	一次单调	8.0	0.5	240
1-5	1	一次单调	10.0	0.5	240
2-1	2	一次单调	2.0	10.0	240
2-2	2	一次单调	4.0	10.0	240
2-3	2	一次单调	6.0	10.0	240
2-4	2	一次单调	8.0	10.0	240
2-5	2	一次单调	10.0	10.0	240
3-1	3	一次单调	3.0	1.0	240
3-2	3	一次单调	3.0	2.0	240
3-3	3	一次单调	3.0	5.0	240
3-4	3	一次单调	3.0	10.0	240
3-5	3	一次单调	3.0	20.0	240
4-1	4	一次单调	4.0	1.0	240
4-2	4	一次单调	4.0	2.0	240
4-3	4	一次单调	4.0	5.0	240
4-4	4	一次单调	4.0	10.0	240
4-5	4	一次单调	4.0	20.0	240
1-6	1	多次往复循环	2.0	0.5	180
2-6	2	多次往复循环	4.0	0.5	180
3-6	3	多次往复循环	6.0	0.5	180
4-6	4	多次往复循环	8.0	0.5	180

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及力与位移关系

图 3 以 1-2 工况为例,给出了在不同加载位移下支座的变形情况,可以看出,当加载位移较小时,支座主要发生水平剪切变形,支座和钢板间基本不

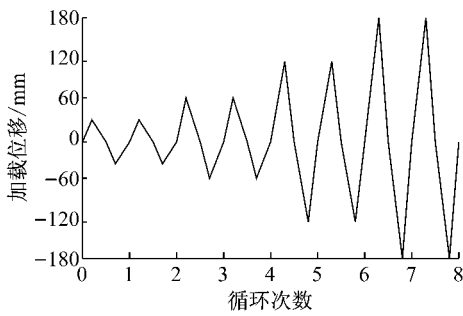


图 2 多次往复循环试验加载制度
Fig. 2 Cyclic loading protocol in the test

发生相对滑动,如图 3a,3b 所示,随着加载位移的增加,支座的自身剪切变形会逐渐增大,同时支座与钢板间开始产生少量的滑动,如图 3c,3d 所示,当加载位移增大到一定值时,支座和钢板间发生较为明显

的相对滑动,此后支座的位移主要由滑动位移贡献,支座自身的水平剪切变形不再随加载位移的增加而增大,如图 3e,3f 所示. 为了更直观地说明支座位移在整个阶段的变化过程,图 4 绘出了工况 1-2 中加载总位移、橡胶层水平剪切变形以及支座与钢板间相对滑动位移随加载位移的变化关系,随着水平加载位移的不断增大,支座位移的变化大致可分为 3 个阶段,当加载位移为 0~30 mm 时,支座位移由橡胶层自身剪切变形贡献;当加载位移 D 为 30~114 mm 时,支座位移由橡胶层剪切变形和支座与钢板间相对滑动位移组成;当加载位移超过 114 mm 时,支座自身剪切变形基本保持不变,此时支座位移的增加量主要由相对滑动位移贡献.

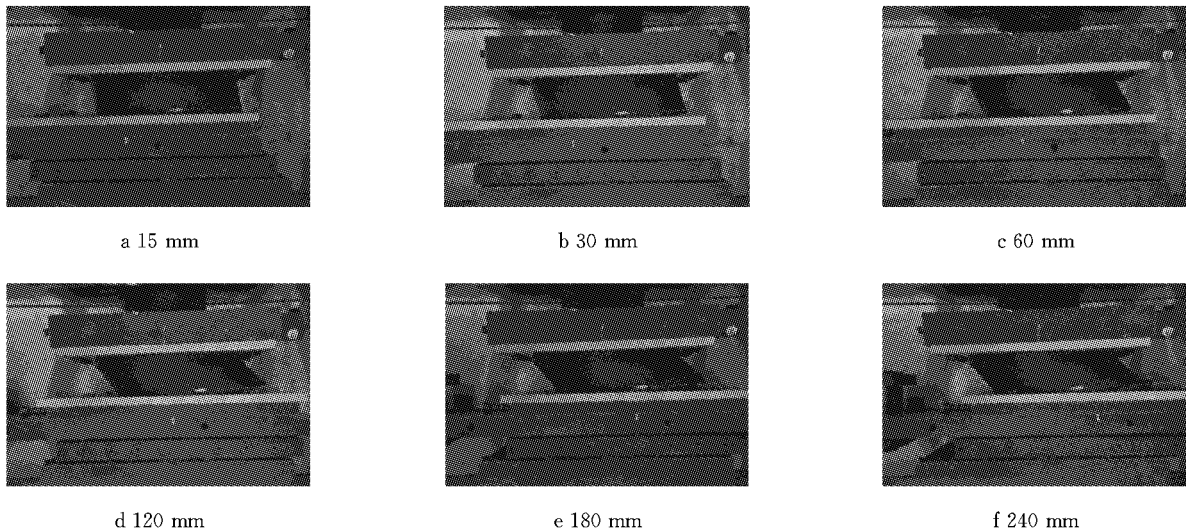


图 3 工况 1-2 不同加载位移下支座变形情况

Fig. 3 Bearing deformation at different loading displacement in case 1-2

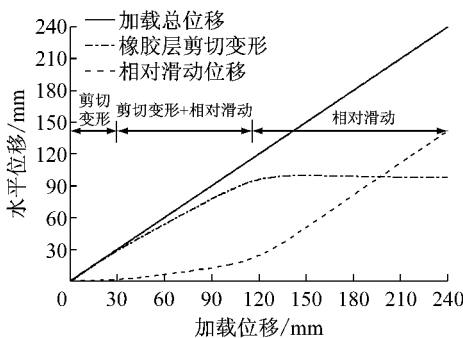


图 4 工况 1-2 下支座水平位移随加载位移的变化过程
Fig. 4 The variation process of bearing horizontal displacement with loading displacement in case 1-2

图 5 和图 6 绘出了部分试验工况下支座的力与位移关系曲线,图中圆圈标记用于表示支座开始发生明显滑动时的位移,即临界滑动位移,当加载位移

超过临界滑动位移后,支座橡胶层剪切变形不再随加载位移的增大而增大. 一次单调加载下部分试验工况的支座力与位移关系曲线如图 5 所示,对比工况 1-1,1-2 及 1-3 可知,随着竖向压应力的增加,支座与钢板间滑动摩擦力会相应增大,同时支座临界滑动位移也会增大(如图中圆圈标记所示). 工况 1-2,4-4 和 4-5 用于表示在相同竖向压应力下加载速率对支座力与位移关系的影响,可以看到,加载速率的增大同样会使支座滑动摩擦力及临界滑动位移增加,但当加载速率增大到一定值时(v 为 $10.0 \sim 20.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$),支座滑动摩擦力不再增加,其力与位移曲线也基本不再受加载速率的影响. 同时从图中还可以看出,加载速率的增加还会导致支座最大静摩擦力和滑动摩擦力间差异更加显著,如图工况 4-4 和 4-5 所示.

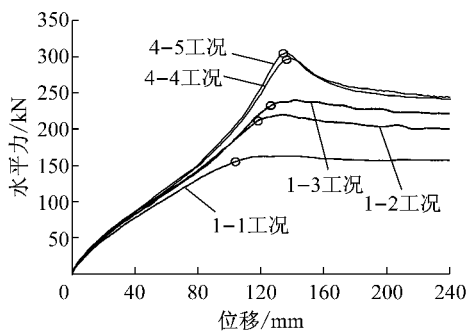
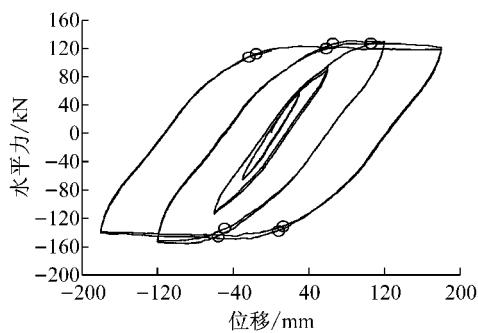
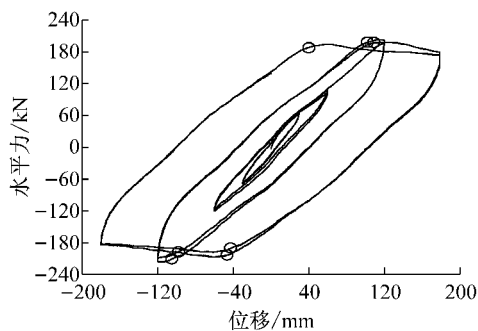


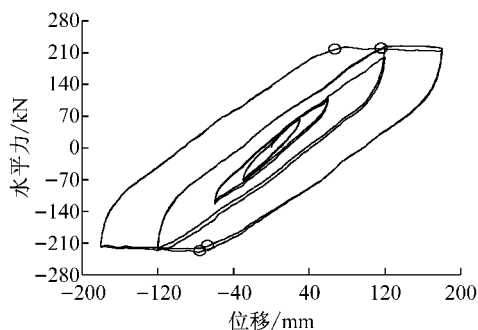
图 5 一次单调加载情形支座水平力与位移关系
Fig.5 Sample horizontal force versus displacement results for monolithic loadings



a 工况 1-6



b 工况 2-6



c 工况 4-6

图 6 多次往复荷载下支座水平力与位移滞回曲线
Fig.6 Sample horizontal force versus displacement curves for cyclic loadings

多次往复荷载下支座力与位移滞回曲线如图 6 所示,可以看出,当加载位移较小时,水平力仅由支

座的剪切变形提供,由于橡胶材料本身非线性的影响,支座的力与位移滞回曲线会呈狭长型,但可近似认为其力与位移关系为线弹性;随着加载位移的不断增大,支座自身的剪切变形逐渐增大,当水平力达到支座与钢板间的滑动摩擦力时,支座开始发生明显滑动,此时支座的力与位移关系呈双线性关系,滞回环较为饱满,摩擦耗能能力逐渐凸显.从图中还可以看出,随着循环加载次数的不断增加,支座会表现出一定强度退化现象,即支座与钢板间滑动摩擦力会有所降低,同时对比图 6a,6b 和 6c 可知,竖向压应力的增加在增大支座滑动摩擦力的同时还会使支座卸载过程中刚度强化现象变得更加显著.

2.2 水平剪切刚度和剪切变形

在支座与钢板发生明显相对滑动之前,支座的位移主要由其自身水平剪切变形提供,因此支座的水平剪切刚度和剪切变形是其重要的抗震性能指标.支座水平剪切变形可采用与橡胶层厚度的比值来表征,而与橡胶支座水平剪切刚度一一对应的是其剪切模量,国内外相关规范对于橡胶支座剪切模量和剪切变形有着明确规定:AASHTO 规范^[8]以试验中 0~50% 剪切应变得到的割线剪切模量(G_1)表征支座的弹性剪切模量,常温下 G_1 的推荐取值为 550~1 200 kPa,同时规定在使用荷载下支座的水平剪切应变不得超过 50%;而我国交通运输部颁行业标准《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4—2004)^[9]规定,板式橡胶支座的实测弹性剪切模量(G_2)可按照下列公式计算:

$$G_2 = \frac{\tau_{1.0} - \tau_{0.3}}{\gamma_{1.0} - \gamma_{0.3}} \quad (1)$$

式中: $\tau_{1.0}$ 、 $\gamma_{1.0}$ 分别表示 1 000 kPa 级试验荷载下的剪切应力和剪切应变; $\tau_{0.3}$ 、 $\gamma_{0.3}$ 分为 300 kPa 级试验荷载下的剪切应力和剪切应变.在静力设计计算时, G_2 一般取为 1 000 kPa,同时使用荷载下的最大容许剪切应变值为 70%.

在考虑板式橡胶支座滑动的情况下,支座的橡胶层最大剪切变形远远大于使用荷载下的容许变形,因此采用名义剪切模量(G_e)表征橡胶支座滑动前的水平剪切刚度,具体定义为支座发生明显滑动时对应的割线模量.表 2 列出了一次单调加载工况下得到的支座水平向剪切模量,同时表中还给出各工况下支座临界滑动位移值和加载过程中橡胶层的最大剪切应变值.从表中可以得到,各工况下 G_1 的值在 1 100~1 500 kPa 之间, G_2 的计算值在 900~1 000 kPa 之间,而 G_e 的计算值在 700~1 100 kPa 之间.可以看出,按照 AASHTO 方法计算得到的剪

切模量远大于我国部颁标准计算值以及本文提出的名义剪切模量值. 各工况下支座临界滑动位移在 102~158 mm 之间, 对应于 170%~263% 的橡胶层厚度, 大于橡胶层最大剪切应变值(144%~246%), 这主要是由于在发生明显滑动之前支座与钢板间已

经发生了少量滑动(见图 4), 从表中还可以看出, 随着竖向压应力和滑动速率的增大, 支座临界滑动位移、橡胶层最大剪切应变以及支座的名义剪切模量 G_e 都会相应地增加.

表 2 一次单调加载工况下汇总的支座水平向剪切特性

Tab. 2 Summary of bearing shear characteristics for monolithic loadings

工况	G_1/kPa	G_2/kPa	G_e/kPa	临界滑动位移/mm	临界滑动位移与橡胶层厚度比值/%	橡胶层最大剪切应变/%
1-1	1 178	951	725	102	170	144
1-2	1 234	1 013	857	112	187	163
1-3	1 202	942	884	116	193	179
1-4	1 212	956	897	114	190	181
1-5	1 222	951	926	120	200	185
2-1	1 229	963	704	125	208	173
2-2	1 278	980	933	138	230	206
2-3	1 230	947	957	145	242	217
2-4	1 267	949	1 009	151	252	227
2-5	1 290	985	1 109	158	263	246
3-1	1 180	929	716	123	205	173
3-2	1 204	944	771	129	215	185
3-3	1 189	944	791	132	220	192
3-4	1 334	974	898	134	223	204
3-5	1 397	985	909	141	235	208
4-1	1 198	916	827	126	210	190
4-2	1 168	961	884	129	215	198
4-3	1 231	970	918	131	218	208
4-4	1 384	974	949	138	230	213
4-5	1 434	975	962	144	240	219

2.3 滑动摩擦系数

图 7 给出了不同工况下支座水平力和竖向力比值(α)与水平加载位移间的关系曲线, 图中曲线的平台段数值即为支座与钢板间的滑动摩擦系数, 可以看出, 竖向压应力和滑动速率的改变对支座滑动摩擦系数的大小有着重要影响, 较小的竖向压力和较大的滑动速率都会导致支座滑动摩擦系数相应增大. 图 8 绘出了支座滑动摩擦系数随滑动速率和竖向压应力的变化关系, 从图中可以看出, 支座滑动摩擦系数随滑动速率的增加呈现先增大后趋于稳定的趋势, 当速率超过 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 后, 摩擦系数值基本保持不变, 同时在滑动速率保持恒定的前提下, 随着竖向压应力的增大, 支座的滑动摩擦系数逐渐减小.

根据相关文献^[10-11]的研究成果, 支座的滑动摩擦系数 μ 与滑动速率 v ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)、竖向压应力 σ (MPa) 的关系可近似采用如下公式来表征:

$$\begin{cases} \mu = \mu_{\text{fast}} - (\mu_{\text{fast}} - \mu_{\text{slow}})e^{-av} \\ \mu_{\text{fast}} = b_{\text{fast}}\sigma^{n_{\text{fast}}-1} \\ \mu_{\text{slow}} = b_{\text{slow}}\sigma^{n_{\text{slow}}-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_{fast} 为支座在高速滑动时的摩擦系数; μ_{slow} 为支

座在低速滑动时的摩擦系数; a 为表征滑动摩擦系数值由低速向高速转化时的常数; $b_{\text{fast}}, b_{\text{slow}}, n_{\text{fast}}, n_{\text{slow}}$ 为定义 μ_{fast} 和 μ_{slow} 时的常数, $n_{\text{fast}} \leq 1, n_{\text{slow}} \leq 1$. 根据以上公式, 对图 8 中的数据点进行拟合, 可以得到支座与钢板间滑动摩擦系数与滑动速率和竖向压应力关系的回归公式, 如式(3)所示:

$$\mu = 1.1\sigma^{-0.59} - (1.1\sigma^{-0.59} - 1.02\sigma^{-0.72})e^{-0.39v} \quad (3)$$

图 8a 分别给出了支座在低速滑动和高速滑动下滑动摩擦系数与竖向压应力的拟合关系曲线, 其中 $v=0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $v=10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 分别表征支座低速滑动和高速滑动时的速率, 图 8b 绘出了给定 $\sigma=3 \text{ MPa}$ 和 $\sigma=4 \text{ MPa}$ 下支座滑动摩擦系数与滑动速率的拟合曲线, 可以看到, 以上曲线对各个数据点的拟合度较好, 因此可以采用式(3)表征支座与钢板间滑动摩擦系数随滑动速率和竖向压应力的变化.

3 考虑板式橡胶支座滑动的力学模型

基于以上对试验结果的分析, 提出采用精细化

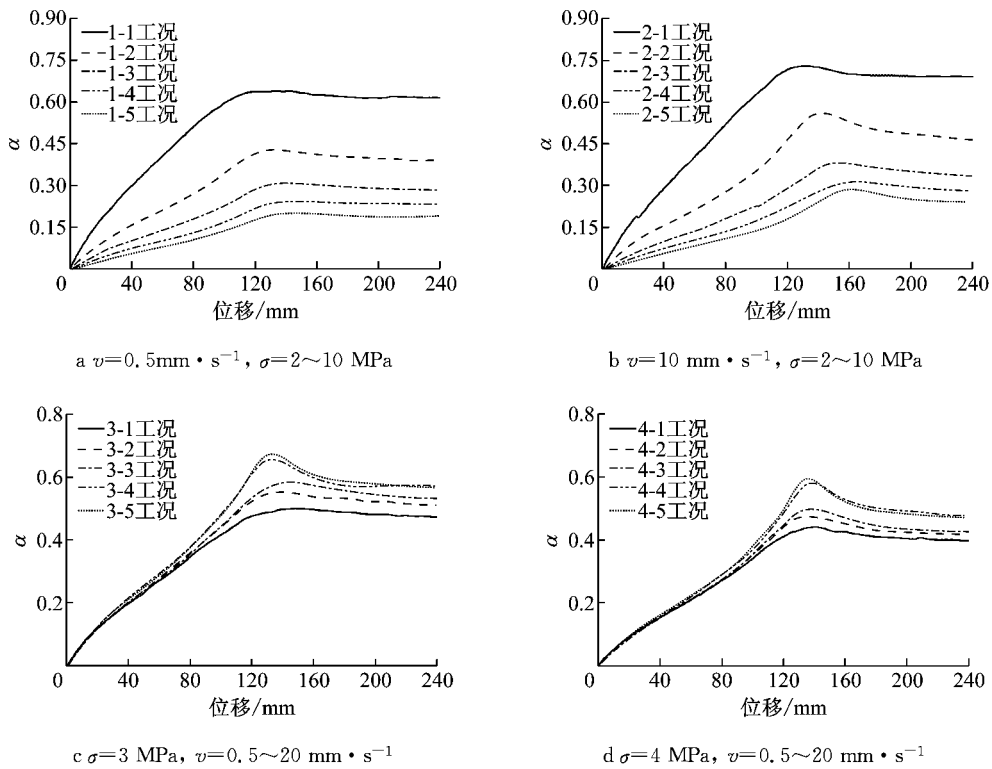


图 7 不同工况下 α 与加载位移的关系

Fig.7 α versus loading displacement for different cases

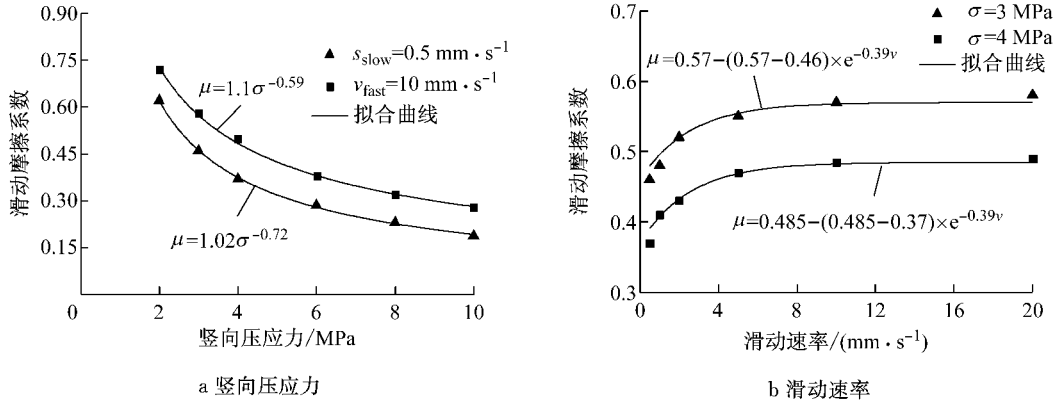


图 8 滑动摩擦系数随竖向压应力和滑动速率的变化关系

Fig.8 Variation of sliding friction coefficient with vertical stress and sliding velocity

双线性滞回力学模型(见图 9)来模拟板式橡胶支座与钢板间的滑动摩擦效应,该力学模型可考虑竖向压应力和滑动速率变化对支座滑动摩擦效应的影响,其中 K_e 表征板式橡胶支座的水平剪切刚度; N 表示支座承受的竖向压力, $N = \sigma A$, A 为橡胶支座的剪切面积。

水平剪切刚度 K_e 的计算公式如下:

$$K_e = \frac{G_e A}{\sum t} \quad (4)$$

式中: $\sum t$ 为支座橡胶层的总厚度; 根据试验结果, 名义剪切模量 G_e 取值为 700~1 100 kPa, μ 可通过

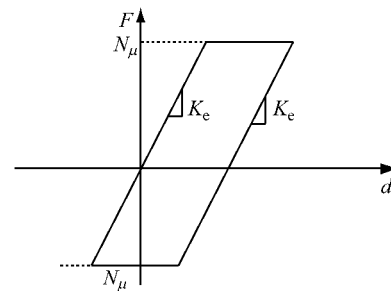


图 9 考虑板式支座与钢板间滑动的力学计算模型

Fig.9 Analytical model considering the sliding between laminated-rubber bearings and steel plate

下式计算:

$$\mu = 1.1\sigma^{-0.59} - (1.1\sigma^{-0.59} - 1.02\sigma^{-0.72})e^{-0.39v} \quad (5)$$

其中 σ 值通常为 2~10 MPa.

4 结论

(1) 随着加载位移的不断增大,板式橡胶支座与钢板间的变形过程共分为 3 个阶段:①仅发生弹性剪切变形;②剪切变形逐渐增加,同时支座与钢板间发生少量滑动;③支座剪切变形保持不变,支座与钢板间摩擦滑动位移逐渐增加.

(2) 可采用本文提出的名义剪切模量表征板式支座的水平剪切刚度,在考虑支座与钢板间摩擦滑动效应的情况下,名义剪切模量的取值为 700~1 100 kPa.

(3) 板式支座与钢板间滑动摩擦系数与支座的竖向压应力呈负相关、与支座滑动速率呈正相关,可通过对试验数据拟合得到的相关公式来表征滑动摩擦系数随竖向压应力和滑动速率的变化关系.

(4) 提出采用精细化双线性滞回力学模型模拟支座与钢板间滑动摩擦效应,考虑了竖向压应力和滑动速率影响,该力学模型的提出可为后续新型准隔震系统研究提供理论依据.

(5) 需要特别说明的是,本试验没有考虑板式橡胶支座随时间变化的相关特性,所有支座试件均为最新加工制作,由于地震发生时间的不确定性,在实际工程应用中,可根据支座的老化特性对本文提出的计算模型进行相应的修正,以使其更加接近真实情况.

参考文献:

- [1] 胡兆同, 陈万春. 桥梁通用构造及简支梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
HU Zhaotong, CHEN Wanchun. General bridge structures and simply-supported girder bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [2] 陈乐生, 庄卫林. 汶川地震公路震害调查—桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
CHEN Lesheng, ZHUANG Weilin. Reports on highways' damage in Wenchuan Earthquake—bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [3] LI Jianzhong, PENG Tianbo, XU Yan. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan Earthquake and corresponding seismic design recommendations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 337.
- [4] 黄小国. 连续梁桥防落梁装置试验和理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
HUANG Xiaoguo. Experimental and theoretical research on unseating-prevention device for continuous bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [5] 方圆. 汶川地震典型简支梁桥震害分析及横向限位装置研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
FANG Yuan. Research on typical damage of simple supported beam bridge during Wenchuan Earthquake and transverse restraint Device[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [6] 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, 2012, 18(7): 612.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. JT/T 663—2006 公路桥梁板式橡胶支座规格系列[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JT/T 663—2006 Series of elastomeric pad bearings for highway bridges[S]. Beijing: China Communication Press, 2006.
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO M251-06 Standard specification for plain and laminated elastomeric bridge bearings[S]. Washington D C: [s. n.], 2008.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JT/T 4—2004 公路桥梁板式橡胶支座[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JT/T 4—2004 Plate type elastomeric pad bearings for highway bridges[S]. Beijing: China Communication Press, 2004.
- [10] Bowden F P, Tabor D. The friction and lubrication of solids—Part II [M]. London: Oxford University Press, 1964.
- [11] Constantinou M C, Mokha A, Reinhorn A. Teflon bearings in base isolation II: Modeling [J]. Journal of Structure Engineering, 1990, 116(2): 455.