

于伟栋,张永亮,冯亚成,等.同球向双球面减隔震支座关键部件力学参数影响因素分析[J].地震工程学报,2019,41(5):1199-1206.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1199

YU Weidong,ZHANG Yongliang,FENG Yacheng,et al.Influencing Factors on Mechanical Parameters for Key Components of a Double-Spherical Surface Seismic Isolation Bearing with the Same Spherical Direction[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(5):1199-1206.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1199

同球向双球面减隔震支座关键部件 力学参数影响因素分析

于伟栋¹,张永亮¹,冯亚成²,胡尊洁³

(1.兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070; 2.中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043;
3.兰州交通大学 交通运输学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:以同球向双球面减隔震支座中的剪力销与减震棒耗能器为研究对象,针对减隔震支座剪力销和减震棒力学参数的影响因素及其规律进行研究。通过反应谱分析和有限元数值模拟的方法讨论了墩高和场地类型变化对剪力销剪断力的影响和减震棒几何参数对减震棒力学性能的影响,同时分析了减震棒在屈服荷载和极限荷载作用下的应力应变分布情况。结果表明,支座剪力销剪断力受墩高和场地条件的影响较大,不能简单地取支座竖向力与某一百分数的乘积设置剪力销的剪断力;减震棒的力学性能主要受 d_0 、 L_1 和 L_3 个几何参数控制,本文给出的几何参数对减震棒力学性能的影响规律为减震棒力学参数的初步设置提供了参考。

关键词:轨道交通桥梁;同球向双球面减隔震支座;剪力销;减震棒;受力性能

中图分类号: U448.15;U443.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1199-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.0

Influencing Factors on Mechanical Parameters for Key Components of a Double-Spherical Surface Seismic Isolation Bearing with the Same Spherical Direction

YU Weidong¹, ZHANG Yongliang¹, FENG Yacheng², HU Zunjie³

(1.School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2.China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an 710043, Shaanxi, China;

3.School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In this paper, the shear pin and shock absorber of a double-spherical surface seismic isolation bearing with the same spherical directions were examined. Both influencing factors and rules of shear pin and shock absorber mechanical parameters of the bearing were studied. Using the response spectrum analysis method, effect on the shearing force of the shear pin is discussed by varying pier height and site category. In addition, the influence of geometric parameters on the

收稿日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368034,51768036);甘肃省科技计划资助(17JR5RA103)

第一作者简介: 于伟栋(1990-),男,山东烟台人,硕士生,从事桥梁抗震研究。E-mail:1459655132@qq.com。

通信作者: 张永亮(1975-),男,内蒙古通辽人,教授,博士,从事桥梁抗震理论研究。E-mail:zhangyong_L@126.com。

mechanical properties of the shock absorber are discussed by FEM analysis. Stress and strain distribution of the shock absorber subjected to yield load and ultimate load were also analyzed. Results showed that the shearing force of the shear pin was greatly influenced by pier height and site category. Mechanical properties of the shock absorber were mainly controlled by three geometric parameters, d_0 , L_1 , and L . The influence law of geometric parameters on the mechanical properties of the shock absorber described in this paper can provide a reference for the preliminary setting of the mechanical parameters of the shock absorber.

Keywords: rail transit bridge; double-spherical surface seismic isolation bearing with the same spherical direction; shear pin; shock absorber; mechanical behavior

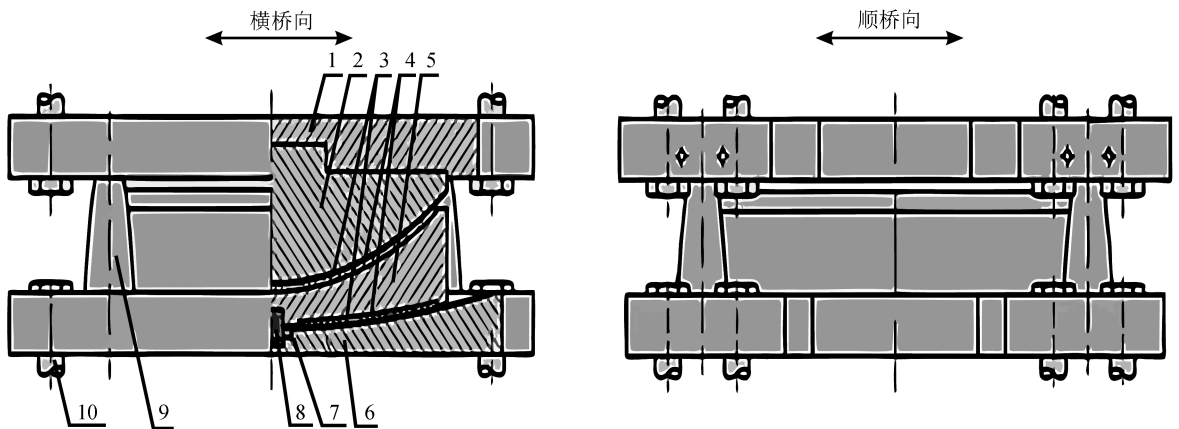
0 引言

为减小桥梁结构的地震作用,在上部结构和下部结构之间设置具有较小水平刚度的减、隔震装置是铁路桥梁隔震的基本思想,这意味着隔震支座需要具有很大的尺寸来满足较大的变形要求,但过大的支座产生的地震位移又可能导致支座剪切破坏或因失稳破坏而落梁^[1]。因此,铁一院开发出同时装备“熔断保护构件(剪力销)”和软钢阻尼器(减震樨)的减隔震支座,是一种既能有效减震,又能大幅度减小支座地震变形的同球向双球面减隔震支座。其中,软钢阻尼器是利用钢材的塑性变形吸收能量的被动耗能装置^[2-4]。目前已有学者对剪力销和减震樨的工作原理和性能进行了研究分析:夏修身等^[5]基于摩擦摆支座减、隔震桥梁采用数值方法研究了剪力销对减、隔震桥梁地震反应的影响;李立峰等^[6]提出了剪力销的简化计算公式,分析了剪力销的减、隔震效果以及剪力销数目设置对减、隔震效果的影响;Nielsen 和 Choi 等^[7-8]讨论了剪力键在 OpenS-

ees 中的模拟方法;孟兮等^[9-10]通过实验确定了减震樨的合理截面形式以及对其滞回耗能性能进行了评估;梁轩等^[11]建立了基于悬臂梁横向弯曲运动理论的减震樨非线性动力学模型,提出了一种基于广义 α 法的时间积分算法;李爱丽等^[12]通过实验对比研究了软钢减震樨滞回性能和弯曲变形的关键因素。以上研究主要针对这种新型支座的剪力销和减震樨两个主要部件进行具体研究。对于像同球向双球面减隔震支座需要剪力销和减震樨协同工作的研究较少,本文将在前人研究的基础上对剪力销剪断力和减震樨的力学参数影响因素进行分析。

1 同球向双球面减隔震支座工作原理

同球向双球面减隔震支座分为固定支座、纵向活动支座、横向活动支座和多向活动支座^[13]。由于篇幅限制本文只给出固定支座的结构示意图(图1)。其上摆和中间摆为球面接触,球面半径较小,以两球面间的相对转动适应梁的转动变形;中间摆和



1.上支座板; 2.上摆; 3.球面不锈钢钢板; 4.球面改性聚四氟乙烯板;
5.中间摆; 6.下摆座; 7.挡圈; 8.剪力销; 9.耗能器; 10.锚柱

图1 固定支座结构示意图

Fig.1 Fixed support structure diagram

下摆的接触面为半径较大的球面,两球面之间由剪力销连接,剪力销是一种熔断保护机制,当地震力超过剪力销的剪切强度后剪力销被剪断,中间摆与下摆之间的约束被解除而产生相对滑移,切断了地震力的传递途径,同时,设置在上支座板与下摆座之间的耗能器开始通过滞回耗能散地震能量并限制支座发生过大变形量。

2 同球向双球面减隔震支座剪力销剪断力合理取值分析

2.1 剪力销剪断力取值原则

减震樵在列车牵引力、制动力以及多遇地震等较小水平荷载作用下会产生弹性变形位移,支座上的剪力销可使正常使用状态的支座处于锁定状态以消除这种弹性变形。基于铁路桥梁“两阶段设计”设计原则,剪力销剪断力的确定应遵守以下规律:

(1) 正常使用及多遇地震作用时:剪力销需能抵抗列车牵引力、制动力等非地震荷载的水平荷载以及多遇地震水平荷载,并具有一定的安全系数。

文献[14]指出为保障桥梁正常使用功能,通常剪力销剪断力不应小于 1.5 倍的列车制动力。

(2) 罕遇地震力作用时:为了保证剪力销及时剪断,防止桥墩由于承受较大的地震力而产生较大的塑性变形,给震后的修复工作带来巨大的困难,剪断力的取值不能过大,一般超出多遇地震作用下墩顶水平力的 5%~20%^[6]。本文以多遇地震作用下墩顶水平力的 1.1 倍作为剪力销的剪断力。

2.2 工程概况

为探究支座剪断力的合理取值,本文以 30 m 轨道交通简支梁桥为例进行多遇地震下的弹性反应谱分析。桥墩采用 C45 钢筋混凝土,顶帽、托盘和承台采用 C40 钢筋混凝土,每跨的梁体质量为 666 t(含二期恒载),梁、墩及承台都采用空间梁单元建模。抗震设防烈度为Ⅷ度,取工程类别为 B 类,相应的多遇地震作用重要性系数为 1.5。为考虑墩高变化对剪力销剪断力的影响,选择墩高为 3.5~20 m 的矩形截面桥墩,下部结构具体尺寸列于表 1。

表 1 下部结构尺寸表

Table 1 Substructure size table

墩高/m	墩身尺寸/(m×m)	承台尺寸/(m×m)	顶帽尺寸/(m×m)
	顺桥尺寸×横桥尺寸	顺桥尺寸×横桥尺寸	顺桥尺寸×横桥尺寸
3.5~10	2.2×2.2	6.2×7.4	2.2×4.8
11~15	2.4×2.5	6.6×8.8	2.4×4.8
16~20	2.6×2.8		2.6×4.8

2.3 地震作用下支座剪断力计算方法

应用 Midas 有限元分析软件建立 30 m 城市轨道交通简支梁桥的单墩计算模型进行弹性反应谱分析。弹性反应谱和单墩模型参考《铁路工程抗震设计规范》^[15]推荐方法,振型组合方法采用 SRSS 法。图 2 为水平地震作用计算图。

为考虑场地条件对剪力销剪断力的影响,在抗震设计分组为第三组的条件下,分别在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类场地类型下进行弹性反应谱分析。地基土对结构的约束作用简化成转动弹簧及平动弹簧施加在承台底,弹簧刚度取值采用 m 法计算。不同场地条件下转动弹簧及平动弹簧计算参数列于表 2。

2.4 数据分析

模型分别在顺桥向与横桥向进行弹性反应谱分析,揭示了在不同墩高和不同场地条件下墩顶支座剪力销剪断力的变化规律,具体数据结果比较见图 3 和图 4。其中,弹性反应谱分别沿顺桥向和横桥向输入。

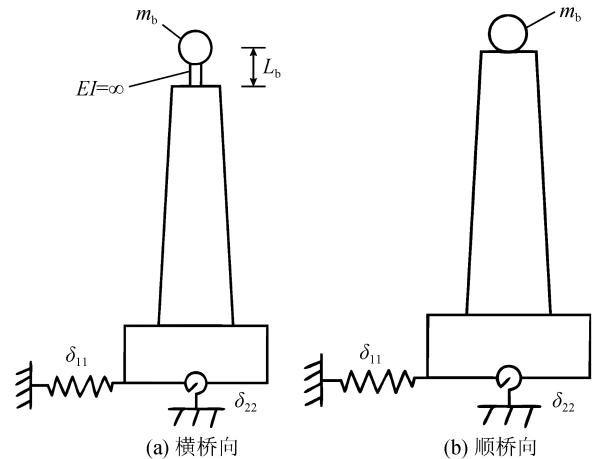


图 2 桥墩水平地震作用计算图示

Fig.2 Horizontal seismic action calculation of bridge pier

由图 3、图 4 可知:(1)场地条件不变时,剪力销剪断力随墩高的增加而减小;(2)以Ⅱ类场地条件为例说明剪力销剪断力随墩高的变化规律:当墩高 ≤ 7.5 m 时,剪断力基本不变;当 7.5 m $<$ 墩高 ≤ 15 m 时,剪断力变化幅度较大;当墩高 > 15 m 时,剪断力

变化幅度趋缓;(3)墩高固定时,场地特征周期越长,剪力销剪断力越大;(4)对于矮墩,剪力销剪断力受场地条件的影响较小;对于较高的桥墩,剪力销剪断力受场地条件的影响较大,以 15 m 墩高为例,Ⅲ类

场地条件下的剪力销剪断力最大为Ⅰ类场地的 1.67 倍;(5)支座剪力销剪断力受墩高和场地条件的影响较大,不能简单地取支座竖向力与某一百分数的积作为剪力销的剪断力。

表 2 转动弹簧及平动弹簧计算参数

Table 2 Calculation parameters of rotational spring and translational spring

场地类别	转动刚度/(kN·m·rad ⁻¹)		平动刚度/(kN·m ⁻¹)	
	顺桥向	横桥向	顺桥向	横桥向
Ⅰ	3.83E+07	5.85E+07	2.80E+06	2.80E+06
Ⅱ	3.16E+07	4.80E+07	2.13E+06	2.13E+06
Ⅲ	2.38E+07	3.55E+07	1.60E+06	1.60E+06

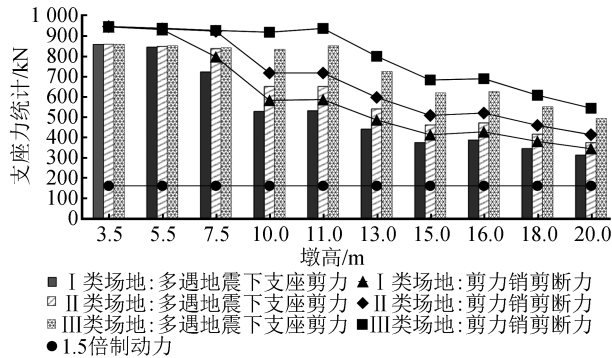


图 3 顺桥向各力对比值

Fig.3 Comparison of longitudinal forces

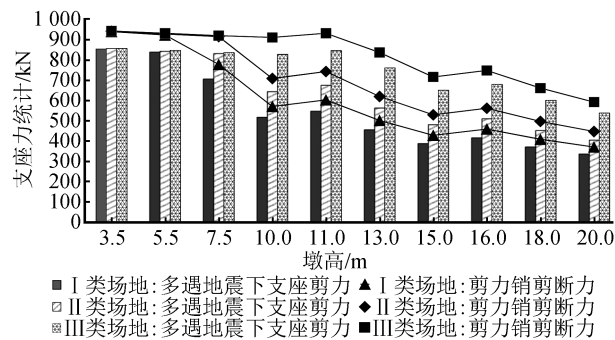


图 4 横桥向各力对比值

Fig.4 Comparison of transverse forces

3 减震棒关键参数分析

3.1 减震棒结构形式

图 5 为减震棒的计算尺寸。图中,AB 段为过渡段, u 为减震棒上、下两端的相对位移, F 为水平力。BC 段为同时屈服的核心耗能段,则:

$$d(x) = a \times x^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: x 为 F 作用点至棒身-截面的距离; a 为截面常数。上式表明核心耗能段的直径按照三分之一抛物线变化。图 5 中 d_0 为过渡段与核心耗能段分界截面的直径; L_1 表示计算过渡段高度; L 为减震棒

的计算总高度。减震棒的具体结构尺寸可由上述 3 个参数决定,以 d_0 、 L_1 、 L 3 个表示减震棒截面直径变化如下:

$$d(x) = \begin{cases} d_0 & (0 \leq x \leq L_1) \\ d_0 x^{1/3} / L_1^{1/3} & (L_1 \leq x \leq L) \end{cases} \quad (2)$$

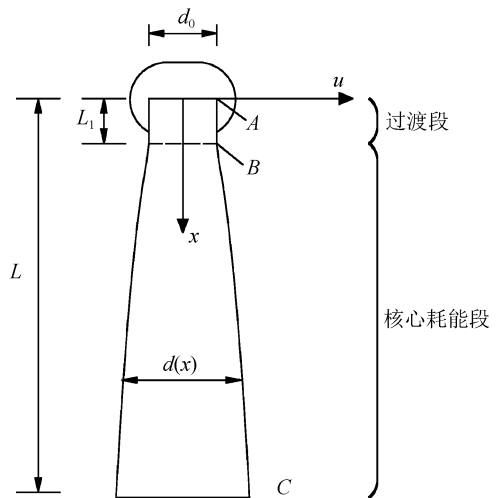


图 5 减震棒计算尺寸图示

Fig.5 Calculation size of shock absorber

3.2 减震棒有限元仿真分析

3.2.1 减震棒有限元模型建立

减震棒采用低屈服钢材 LYP160,文献[16]在试验的基础上给出了 LYP160 钢材本构关系。LYP160 钢材弹性模量为 2.05×10^5 MPa,泊松比取 0.3,屈服强度 129 MPa,抗拉强度 273 MPa,抗拉强度对应的极限应变为 0.286。本文保守地采用三分之一极限应变作为本模型的极限应变,采用 ANSYS 有限元软件模拟减震棒,模型选用 solid45 单元建立棒身的实体模型,强化准则采用各向同性强化(MISO)准则,屈服准则为 Von Mises 准则。减震棒的根部固结,另一端自由,并在自由端进行位移加载。减震棒有限元模型见图 6。

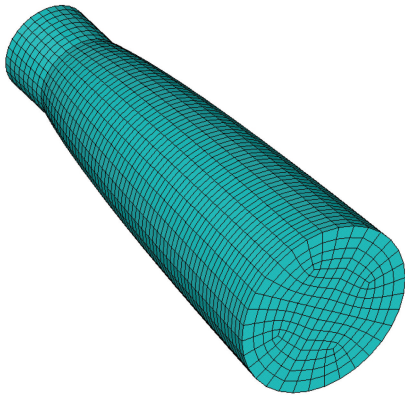


图 6 减震棒有限元模型

Fig.6 Finite element model of shock absorber

3.2.2 减震棒应力应变分布规律

为使剪力销剪断之后,减震棒能够充分发挥耗能作用,减震棒的屈服力不应过大。下面以 I 类场地条件下,墩高 20 m 时采用的减隔震支座中减震棒为例说明其达到屈服荷载和极限荷载时的应力状态,减震棒的尺寸如下: $d_0 = 27 \text{ mm}$; $L_1 = 18 \text{ mm}$; $L = 160 \text{ mm}$ 。其中,极限荷载代表减震棒外缘纤维达到材料弹塑性极限应变时对应的棒顶水平力,与极限荷载对应的棒顶水平位移即为极限位移。图 7 为减震棒核心耗能段首次屈服时平行于棒顶作用力方向的轴对称截面的 Mises 应力分布状态。

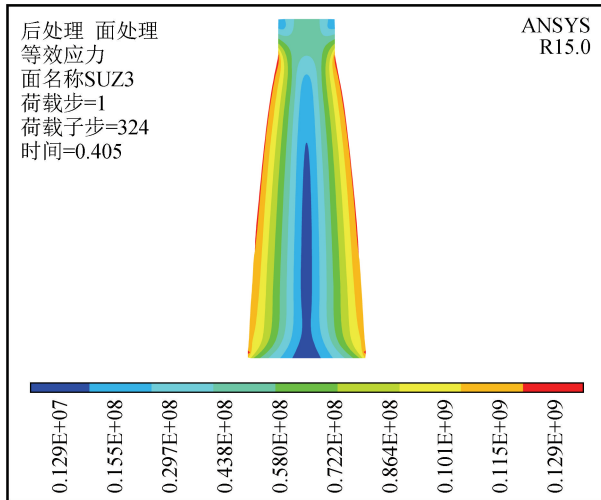


图 7 减震棒核心耗能段首次屈服时 Mises 应力分布
Fig.7 Mises stress distribution at the first yield of the core energy dissipation section of shock absorber

理论上,减震棒核心耗能段的受力特点为:地震作用下,各截面最外缘纤维同时屈服耗能,以达到最佳抗震效果。从图 7 中可以看出除靠近固结端一定区域外,核心耗能段大部分外缘纤维是同时进入屈

服状态的,最大 Mises 应力位于核心耗能段与过渡段交界面的外缘纤维处,最小 Mises 应力位于固结端截面形心处。

图 8 给出了减震棒达到极限荷载时平行于棒顶作用力方向的轴对称截面应力分布状态。

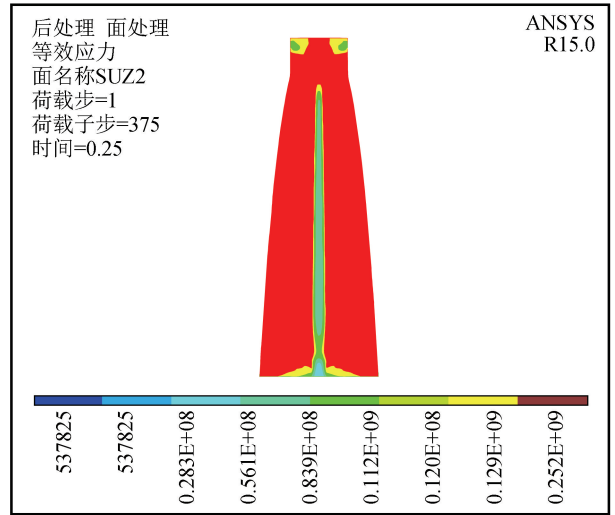


图 8 减震棒达到极限荷载时的 Mises 应力分布
Fig.8 Mises stress distribution of shock absorber under ultimate load

图 8 中的红色部分表示已进入塑性的区域,可以看出减震棒截面大部分区域已进入塑性状态,最大 Mises 等效应力发生在过渡段与核心耗能段的交界面外缘,最大值约为 252 MPa。

图 9 给出了减震棒达到极限荷载时平行于棒顶作用力方向的轴对称截面的等效应变状态。

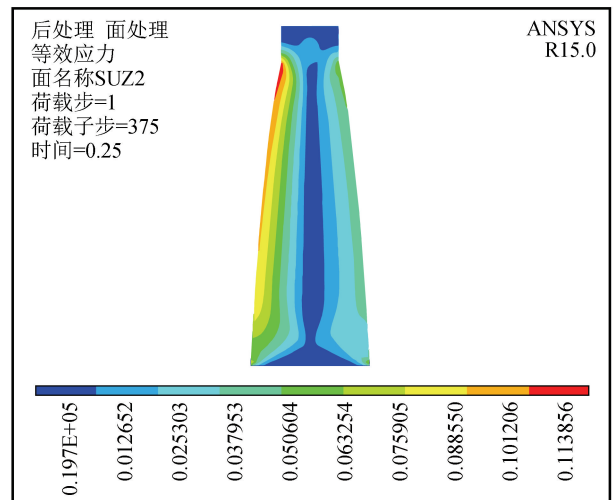


图 9 减震棒极限荷载时最大主应变分布
Fig.9 Maximum principal strain distribution of shock absorber under the ultimate load

从图9中可以看出在极限荷载状态下最大主应变出现在减震棒过渡段与核心耗能段界面受拉侧外缘处,其值略大于设置的最大应变(0.095 3),但远小于材料的极限应变(0.286)。图中可以看出过渡段与核心耗能段界面受拉侧外缘处存在明显的应力集中现象,若继续加载,此处首先产生破坏的可能性较大。

3.3 减震棒形状参数对力学性能的影响

3.3.1 L_1/L 变化对减震棒性能参数的影响

在保持减震棒高度与极限弯矩不变情况下,为探究 L_1/L 的变化对减震棒性能参数的影响,表3给出了一系列不同尺寸的构件。其中屈服位移与屈服荷载基于几何作图法^[17]求得。

表3 考虑 L_1/L 影响时减震棒尺寸

Table 3 Shock absorber size considering the influence of L_1/L

编号	L_1/L	d_0/mm	L_1/mm	L/mm	$d(L)/\text{mm}$
1	0.1	25.96	16	160	55.93
2	0.2	32.71	32	160	55.93
3	0.3	37.44	48	160	55.93
4	0.4	41.21	64	160	55.93
5	0.5	44.39	80	160	55.93
6	0.6	47.17	96	160	55.93

保证材料各项参数不变情况下,对表3中构件进行 ANSYS 模拟分析,图10给出了最典型的1#与6#号减震棒的力-位移曲线。

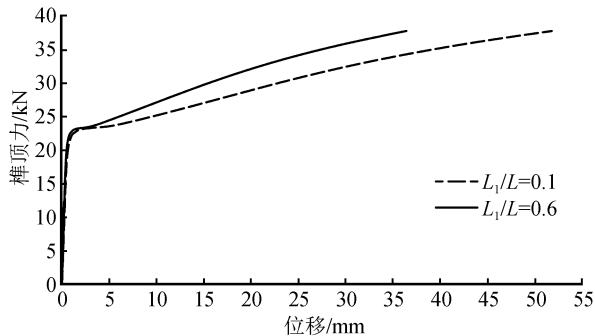


图10 1#和6#减震棒力-位移曲线

Fig.10 Force-displacement curve of shock absorber 1# and 6#

从图10可知:减震棒的极限移随着 L_1/L 的增大而减小。 L_1/L 从0.1增加到0.6的过程中,减震棒最大位移减小约30%。

图11给出了减震棒弹性刚度与位移延性系数随着 L_1/L 的变化规律。图12中给出了 K_2/K_1 、 K_2 随着 L_1/L 变化的变化规律,其中 K_1 为减震棒弹性刚度, K_2 为减震棒屈服后刚度。

图11和图12中可以看出,随着 L_1/L 增加,减

震棒的弹性刚度、 K_2/K_1 、 K_2 都逐渐增加,但位移延性系数逐渐减小,并且变化速率都逐渐增大。

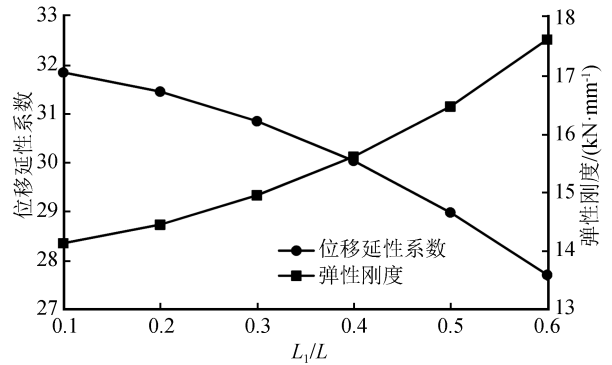


图11 减震棒弹性刚度和位移延性系数随 L_1/L 的变化

Fig.11 Variation of elastic stiffness and displacement ductility coefficient of shock absorber with L_1/L

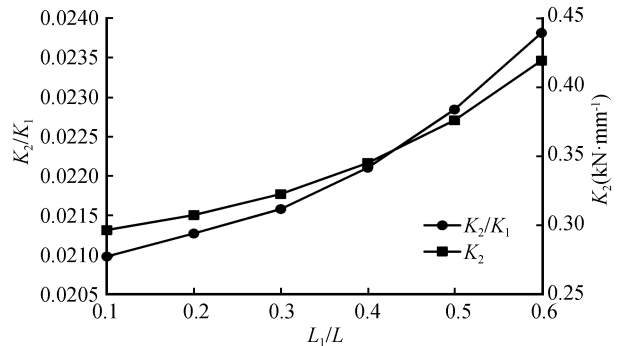


图12 减震棒 K_2/K_1 、屈服后刚度随 L_1/L 的变化

Fig.12 Variation of K_2/K_1 and yield stiffness of shock absorber with L_1/L

3.3.2 d_0/L 变化对减震棒性能参数的影响

d_0/L 可反映减震棒的“胖瘦”程度。在保持构件高度160 mm不变, L_1 为定值, d_0/L 从0.1逐渐增加到0.2的方法可以揭示 d_0/L 变化对减震棒性能参数的影响。屈服位移与屈服荷载同样基于几何作图法^[17]求得。减震棒尺寸设置见表4。

对表4中的减震棒进行有限元模拟分析,图13给出了表3中对应不同 d_0/L 的减震棒力-位移曲线。

从图13中可以看出: d_0/L 的变化对减震棒力学参数性能会产生较大影响。随着 d_0/L 大的增大,屈服荷载和极限荷载都随之增大,屈服位移和极限位移都随之减小。也就是说, d_0/L 越小,构件越“瘦”,柔性越大。

图14给出了 $L_1/L=0.1$ 时, d_0/L 变化对减震棒弹性刚度(K_1)、屈服后刚度(K_2)的影响。图15

表 4 考虑 d_0/L 影响时减震棒尺寸 ($L=160\text{ mm}$)

Table 4 Shock absorber size considering the influence of d_0/L ($L=160\text{ mm}$)

编号	$L_1/L=0.10$		$L_1/L=0.15$		$L_1/L=0.20$	
	d_0/L	$d(L)/\text{mm}$	d_0/L	$d(L)/\text{mm}$	d_0/L	$d(L)/\text{mm}$
1	0.10	34.47	0.10	30.11	0.10	27.36
2	0.12	41.37	0.12	36.14	0.12	32.83
3	0.14	48.26	0.14	42.16	0.14	38.30
4	0.16	55.15	0.16	48.18	0.16	43.78
5	0.18	62.05	0.18	54.20	0.18	49.25
6	0.20	68.94	0.20	60.23	0.20	54.72

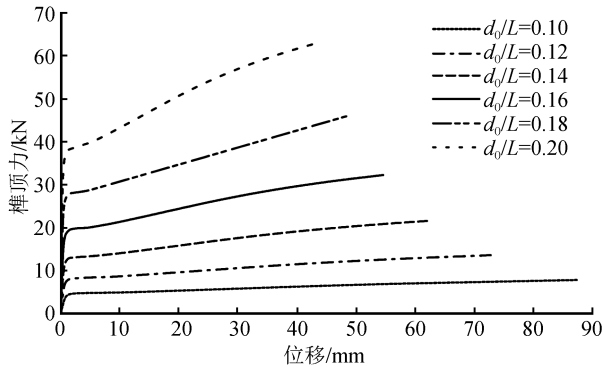


图 13 减震棒力-位移曲线

Fig.13 Force-displacement curve of shock absorber

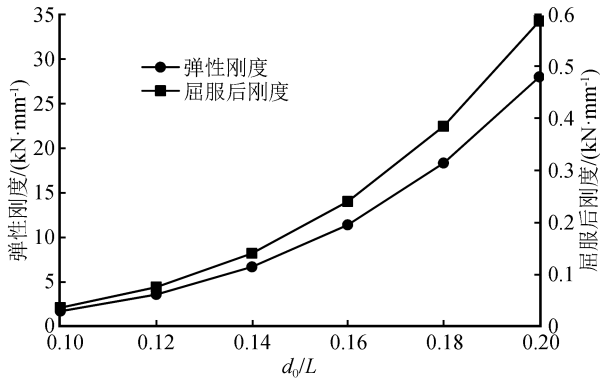


图 14 减震棒弹性刚度和屈服后刚度随 d_0/L 的变化

Fig.14 Variation of elastic stiffness and yield stiffness of shock absorber with d_0/L

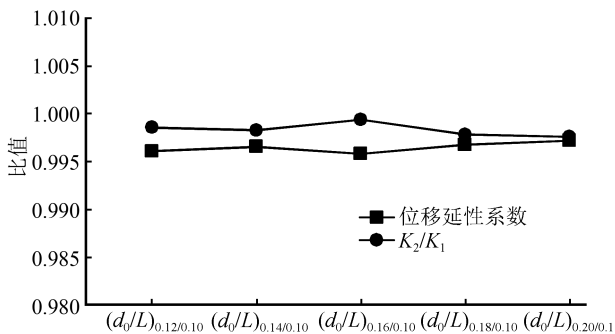


图 15 减震棒 K_2/K_1 和位移延性系数随 d_0/L 的变化

Fig.15 Variation of K_2/K_1 and displacement ductility coefficient of shock absorber with d_0/L

给出了以 $d_0/L=0.10$ 的结果为基准时其余 d_0/L 对应的结果与之的比值,分析了 d_0/L 变化对位移延性系数和 K_2/K_1 的影响,分析数据采用三组结果的平均值。

图 15 中的 $(d_0/L)_{0.12/0.10}$ 表示 $d_0/L=0.12$ 与 $d_0/L=0.10$ 时的位移延性系数、 K_2/K_1 的结果之比。

从图 14、15 中可以看出:减震棒弹性刚度和屈服后刚度都随着 d_0/L 的增大逐渐增大,递增速率都逐渐加快; K_2/K_1 和位移延性系数在 d_0/L 变化过程中基本不变。这是由于随 d_0/L 的增加极限荷载与屈服荷载按同一比例增加,同时,极限位移与屈服位移也是按固定比例同时减小的。由此可见, d_0/L 对弹性刚度和屈服后刚度影响远大于对 K_2/K_1 和位移延性系数的影响。

4 结论

本文以同球向双球面减隔震支座中的剪力销与减震棒耗能器为研究对象,研究了两者的取值原则及关键参数影响因素。得到以下结论:

- (1) 支座剪力销剪断力受墩高和场地条件的影响较大,不能简单地取支座竖向力与某一百分数的乘积作为剪力销的剪断力的取值。
- (2) 剪力销剪断力随墩高的减小或场地特征周期增加而增大。
- (3) 减震棒 L_1/L 的增加会导致其弹性刚度和屈服后刚度的增加,同时,减震棒的位移延性系数随之减小,且变化速率都是逐渐增大的。
- (4) 减震棒越“瘦”,柔性越大,同时,屈服荷载和极限荷载越小。但是,减震棒“胖瘦”对其延性变形性能和 K_2/K_1 的影响极小。

参考文献(References)

[1] 彭天波,李建中,范立础.双曲面球型减隔震支座的开发及应用[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(2):176-180.
PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Analysis of Vertical

- D-displacement of Double Spherical Aseismic Bearing[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, 35(2): 176-180.
- [2] XU L Y, NIE J G, FAN J S. Experiment Investigation and Numerical Analysis on the Low-Yield-Point Steel Shear Panel Dampers[C]//2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, June 23-25, 2014, Orlando, Florida, USA, 2014.
- [3] CHEN Z Y, BIAN G Q, HUANG Y, et al. Hysteretic Behavior of Shear Panel Dampers under High Axial Compression Loading[M]//CHEN Z Y, BIAN G Q, HUANG Y, et al. eds. Volume 9 Number 3. The Hong Kong Institute of Steel Construction, 2013: 190-204.
- [4] PAN P, YAN H, WANG T, et al. Development of Steel Dampers for Bridges to Allow Large Displacement through a Vertical Free Mechanism[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(3): 375-388.
- [5] 夏修身, 陈兴冲, 王希慧, 等. 剪力键对隔震桥梁地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 104-109.
XIA Xiushen, CHEN Xingchong, WANG Xihui, et al. Effect of Shear Key on Seismic Responses of Bridge Using Isolation Bearing[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(6): 104-109.
- [6] 李立峰, 胡思聪, 吴文鹏, 等. 桥梁抗震剪力键的力学模拟及减震效应研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11): 8-14.
LI Lifeng, HU Sicong, WU Wenpeng, et al. Research of Mechanical Simulation and Seismic Mitigation Effect for the Bridge Seismic Dowel[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(11): 8-14.
- [7] NIELSON B G. Analytical Fragility Curves for Highway Bridge-s in Moderate Seismic Zones[D]. Atlanta, Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005: 295-298.
- [8] CHOI E. Seismic Analysis and Retrofit of Mid-America Bridges[D]. Atlanta, Georgia: Georgia Institute of Technology, Civil and Environment Engineering, 2002: 47-66.
- [9] 孟兮, 倪燕平. 减震榀设计及试验研究[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 103-106.
MENG Xi, NI Yanyanping. Design and Experimental Study of Shock Absorber[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(3): 103-106.
- [10] 孟兮, 高日, 李承根. 减震榀滞回性能理论及试验研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(3): 20-25.
MENG Xi, GAO Ri, LI Chenggen. Theoretical and Experimental Study of Hysteretic Behavior of Shock Absorber[J]. Bridge Construction, 2015, 45(3): 20-25.
- [11] 梁轩, 杜建斌. 采用减震榀桥梁非线性动力学分析计算方法[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 136-142.
LIANG Xuan, DU Jianbin. An Approach to Nonlinear Dynamic Analysis of Bridge with Aseismic Absorber[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 136-142.
- [12] 李爱丽, 高日, 李承根, 等. 一种新型软钢减震榀的设计与试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 23-28.
LI Aili, GAO Ri, LI Chenggen, et al. Design and Experimental Study of a Novel Type of Mild Steel Shock Absorber[J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 23-28.
- [13] 中国技术市场协会. T/TMAC 001-2017 同球向双球面减隔震支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
China Technology Market Association. T/TMAC 001-2017 Same Sphere to double Spherical Subtraction Support[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2017.
- [14] 董擎. 基于摩擦摆支座的的城市大跨连续梁桥减震性能研究[J]. 世界桥梁, 2014, 42(6): 46-53.
DONG Qing. Study on Seismic Performance of Urban Long Span Continuous Beam Bridge Based on Friction Pendulum Bearing[J]. World Bridges, 2014, 42(6): 46-53.
- [15] GB50001-2006 铁路工程抗震规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
GB50001-2006 Code for seismic design of railway engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [16] 王萌, 钱凤霞, 杨维国. 低屈服点 LYP160 钢材本构关系研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 55-62.
WANG Meng, QIAN Fengxia, YANG Weiguo. Constitutive behavior of Low Yield Point Steel LYP160[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 55-62.
- [17] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced Concrete Theory and Analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.