

基于数值仿真的简支梁桥震致残余位移分析

顾正伟¹, 张攀², 吕东冶³, 吴春利¹, 杨忠⁴, 谭国金¹, 黄晓明⁵

(1. 吉林大学交通学院, 长春 130022; 2. 长春市建设工程安全监督站, 长春 130033; 3. 吉林省交通信息通信中心, 长春 130021; 4. 吉林省交通规划设计院, 长春 130021; 5. 东南大学交通学院, 南京 210018)

摘要: 基于ANSYS建立了具有铅芯橡胶支座、摩擦摆支座和黏滞阻尼器的简支梁桥有限元模型。通过改变地震激励、结构参数和减隔震装置参数,进行了地震荷载作用下多种工况的桥梁震致残余位移分析。结果表明,残余位移对地震波频谱特性较为敏感,且随峰值加速度、剪跨比的增大显著增大,随持续时间和墩高的增加有所增大;残余位移对铅芯橡胶支座和摩擦摆支座参数变化较为敏感,黏滞阻尼器参数变化对其影响较小,可通过增大铅芯橡胶支座屈服力、屈服后刚度、摩擦摆支座摩擦因数、黏滞阻尼器阻尼孔长度、液缸外径、硅油黏度和减小摩擦摆支座曲率半径的方法降低结构震致残余位移。本文研究结果可为桥梁结构抗灾韧性提升提供理论依据。

关键词: 桥梁工程; 简支梁桥; 震致残余位移; 减隔震装置; 影响要素; 数值模拟

中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)06-1711-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230117

Earthquake-induced residual displacement analysis of simply supported beam bridge based on numerical simulation

GU Zheng-wei¹, ZHANG Pan², LYU Dong-ye³, WU Chun-li¹, YANG Zhong⁴,
TAN Guo-jin¹, HUANG Xiao-ming⁵

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Changchun Construction Projects Quality Surveillance, Changchun 130033, China; 3. Jilin Provincial Traffic Information and Communication Center, Changchun 130021, China; 4. Jilin Traffic Planning and Design Institute, Changchun 130021, China; 5. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: Finite element models of simply-supported beam bridge with lead rubber bearing, friction pendulum bearing and viscous damper was established separately based on ANSYS. Through changing seismic excitation, structural parameters and vibration reduction isolation device parameters, the earthquake-induced residual displacement of bridge was analyzed. The results showed that the residual displacement was sensitive to seismic spectrum characteristics, and it increased significantly both with the rise of peak acceleration and shear span ratio, and it increased with the enlarge of duration and pier height at

收稿日期: 2023-02-08.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600604, 2021YFB2600600); 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJ-KH20211114KJ); 吉林省交通运输科技计划项目(2021-01-02, 2020-1-3, 2020-1-7).

作者简介: 顾正伟(1981-), 女, 讲师, 博士. 研究方向: 桥梁抗震理论与方法. E-mail: gzw@jlu.edu.cn

通信作者: 吴春利(1978-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 桥梁结构健康监测与性能评估. E-mail: clwu@jlu.edu.cn

the same time. The residual displacement was the most sensitive to the change in parameters of lead rubber bearing and friction pendulum bearing, while changes in parameters of viscous dampers had less impact on it. The residual displacement could be reduced by increasing yield force and post-yield stiffness of lead rubber bearing, friction coefficient of friction pendulum bearing, length of the damping hole, outer diameter and viscosity of silicone oil of viscous damper, and by reducing curvature radius of friction pendulum bearing. The research results can provide theoretical basis for the improvement of disaster resilience of bridge structures.

Key words: bridge engineering; simply supported beam bridge; earthquake-induced residual displacement; influencing factors; vibration reduction and isolation device; numerical simulation

0 引言

地震是社会发展中不可忽略的重大灾害,桥梁作为交通线的重要组成部分,一旦遭受强震结构会由于进入塑性变形而产生残余位移,众多桥梁即使没有倒塌也会因为过大的残余位移无法继续使用。因此,研究减小桥梁震致残余位移、提升桥梁抗灾韧性的方法成为桥梁抗震领域亟需解决的问题。

近年来,针对桥梁震致残余位移的研究引起了国内外学者的广泛重视。文献[1-3]系统分析了结构参数对桥梁残余位移的影响,结果表明,可通过增大屈服后刚度有效减小残余位移。余波等^[4]通过对简化后的单自由度体系地震响应进行分析,认为 $P-\Delta$ 效应会显著增加结构残余位移。孙治国等^[5]建立了结构-桩-土相互作用模型,通过计算发现在考虑桩土结构作用的情况下,残余位移角有所增大,且随着土体密度的增大,残余位移角不断减小。申纪创^[6]和 Lioussatou 等^[7]的研究表明,场地类别、震级、震中距、峰值加速度等参数均对残余位移有一定影响,其中场地类别影响最为显著。但以上研究对象均为普通支座桥梁,尚未考虑减隔震装置对桥梁残余位移的影响。

也有一些学者对具有耗能减震装置的桥梁残余位移开展了研究。张艳霞等^[8]提出了一种新型自复位免修复摩擦耗能支撑装置,研究表明,该装置具有很好的耗能能力,残余变形很小。李刚等^[9]提出了自复位变摩擦阻尼器,并给出了该阻尼器的恢复力模型,研究表明其具有良好的滞回性能,可有效减小构件震后残余变形。刘云帅等^[10]设计了一款自复位单向摩擦阻尼器,数值分析和混合试验的对比结果表明,该阻尼器梁桥具有良好的隔震和自复位能力。马永涛等^[11]和杨

毅^[12]分别研发了形状记忆合金-铅芯橡胶复合支座和形状记忆合金-摩擦摆复合支座,通过形状记忆合金丝的施加,桥梁残余位移有了明显降低。但上述研究成果大多基于特定的构造形式,学者通过数值仿真或试验的方法仅对其研发装置的残余位移控制效果进行了研究。

为此,本文针对目前应用较多的减隔震装置,分别建立了具有铅芯橡胶支座、摩擦摆支座和黏滞阻尼器的简支梁桥模型。通过改变地震激励、结构参数和装置参数,探究了各要素对残余位移的影响规律,为减小桥梁震致残余位移、提升桥梁结构抗灾韧性提供理论依据。

1 有限元模型建立

为探究荷载激励、结构参数、减隔震装置参数等要素对桥梁震致残余位移的影响,本文以某 30 m 预应力混凝土简支梁桥为基本工程背景,上部结构采用单箱双室等截面箱梁,桥墩采用圆端形截面,具体尺寸如图 1(a)(b)所示。利用有限元软件 ANSYS 建立分析模型,如图 1(c)所示,其中,主梁和桥墩采用 BEAM188 单元模拟,普通支座采用 COMBIN14 单元模拟,桥墩与地面简化为刚性连接。

本文分别选取具有代表性的位移型减隔震装置铅芯橡胶支座、摩擦摆支座和速度型减隔震装置黏滞阻尼器进行桥梁震致残余位移研究。其中,铅芯橡胶支座和摩擦摆支座的本构模型均可用等效双线性滞回模型模拟,如图 2(a)所示。其中, Q_y 为支座屈服力; u_y 为支座屈服位移; u_B 为支座极限位移; K_1 为支座屈服前刚度; K_2 为支座屈服后刚度; K_B 为支座等效刚度。黏滞阻尼器的本构模型如图 2(b)所示,阻尼力 F 与活塞运动的速度 v 之间存在如下数量关系^[13]:

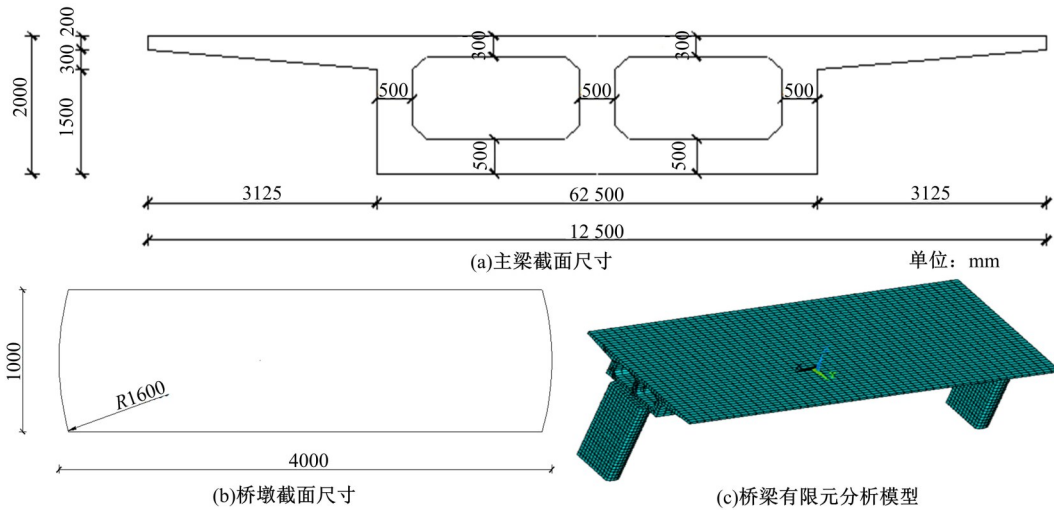


图 1 桥梁结构尺寸及有限元模型

Fig. 1 Structure size and finite element model of bridge

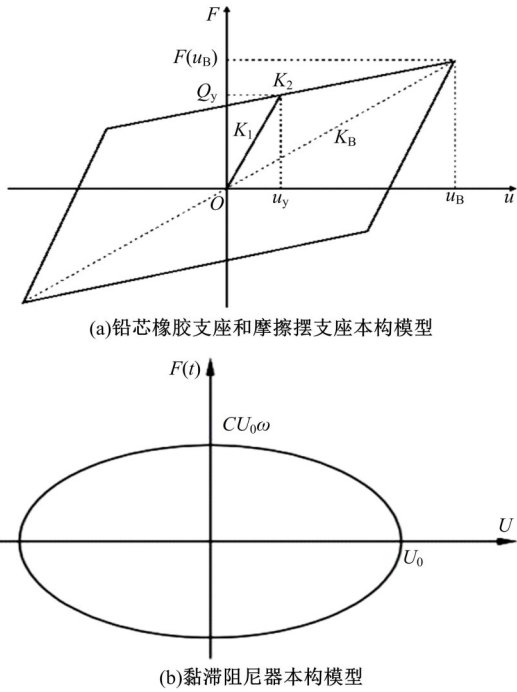


图 2 减隔震装置本构模型

Fig. 2 Constitutive model of vibration reduction and isolation device

$$F = Cv^\alpha \quad (1)$$

式中: C 为阻尼系数; α 为速度指数。

在有限元分析中,铅芯橡胶支座和摩擦摆支座均采用 COMBIN40 单元进行模拟,黏滞阻尼器采用 COMBIN37 单元模拟。

2 地震激励对残余位移的影响

地震动特性主要表征为频谱特性、持续时间和峰值加速度。本文分别选取了 El-centro、Northridge 和 Taft 三条地震波对桥梁进行时程响

应分析,以研究频谱特性对结构震致残余位移的影响,结果如图 3(a)所示。在进行峰值加速度和持续时间的影响分析中,选取 El-centro 波进行加载,对地震波峰值加速度归一化后进行调峰,其值为 $0.1g \sim 0.5g$,对地震波停止时刻做人为限定,持续时间为 $10 \sim 30$ s,各工况下计算结果如图 3(b)(c)所示。

由图 3(b)(c)可以看出:不同地震荷载作用下,相同消能减震装置的桥梁震致残余位移明显不同,不同消能减震装置桥梁在同种地震荷载作用下的结果也有明显差异,说明地震波的频谱特性对桥梁震致残余位移影响较大且对桥梁的减隔震装置形式较为敏感。这是因为,地震动频谱特性显示不同频率分量的强度分布,同时减隔震装置的增设使结构具有不同的自振周期,这些差异引起桥梁震致残余位移不同。峰值加速度数值可以表征地震动强度,因此随着地震波峰值加速度的不断增大,3 种减隔震装置作用下桥梁震后残余位移均逐渐增大,但黏滞阻尼器变化不明显;当峰值加速度大于 $0.2g$ 时,摩擦摆支座和铅芯橡胶支座桥梁残余位移随地震峰值加速度增大而显著增大,当峰值加速度大于 $0.4g$ 时,铅芯橡胶支座桥梁增长略为平缓。桥梁结构残余位移随地震动持续时间的增加而变大,其中黏滞阻尼器桥梁变化较大,铅芯橡胶支座和摩擦摆支座桥梁数值变化不明显。总体来说,持续时间越长的地震作用下桥梁残余位移越大,但其影响不显著,这主要是因为地震波的能量在时间上具有一定的累积效应,在桥梁结构地震反应进入非线性阶段后,地震

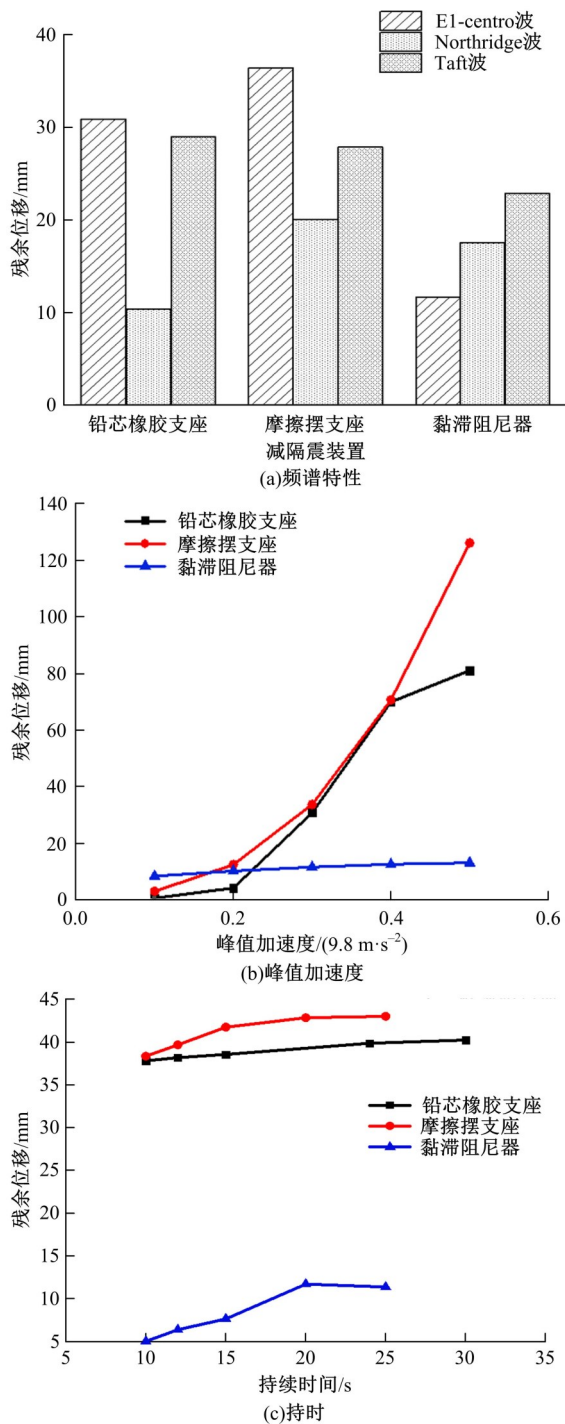


图 3 地震动参数对残余位移影响

Fig. 3 Effect of ground motion parameters on earthquake-induced residual displacement

动持续时间的长短对结构的最终损伤程度有影响,持续时间越长,累积的能量越多,残余位移数值越大。

3 桥梁结构参数对残余位移影响

桥梁结构的自身特性是影响其地震响应和震

致残余位移的关键参数。桥墩高度较低时其刚度较大,随着墩高的增加,桥墩柔性随之增大,因此桥墩所受到的弯矩、剪力和墩顶位移也会随墩高的改变发生明显变化;桥梁结构剪跨比的变化改变了结构的质量,会影响到结构的自振周期。因此本文从刚度和质量两个角度出发,通过改变桥梁结构的墩高和剪跨比,研究结构参数的变化对桥梁残余位移的影响规律,计算结果如图 4 所示。

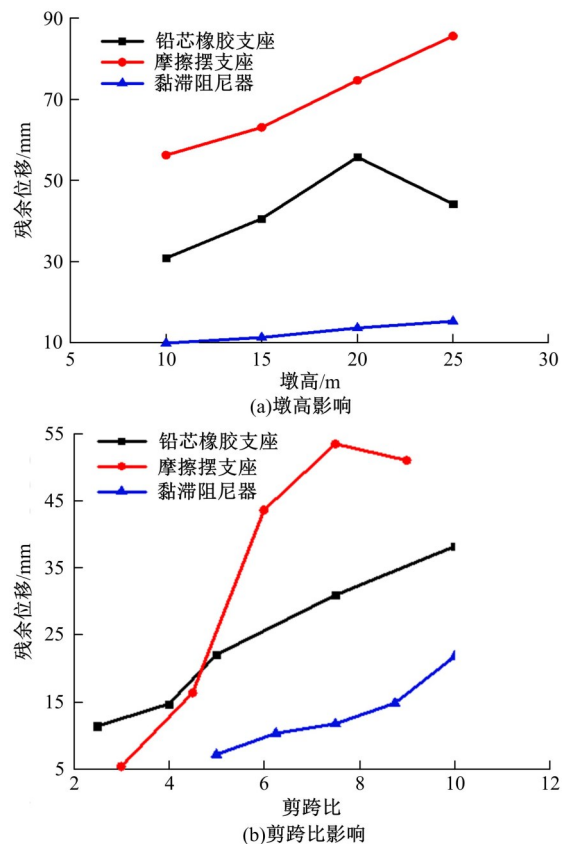


图 4 桥梁结构参数对残余位移影响

Fig. 4 Influence of bridge structural parameters on earthquake-induced residual displacement

由图 4 可以看出:采用摩擦摆支座和黏滞阻尼器的桥梁结构震致残余位移均随着墩高的增大而变大,当墩高由 10 m 增大至 25 m 时,摩擦摆支座桥梁残余位移增加了 52%,黏滞阻尼器桥梁残余位移增大了 15%;而铅芯橡胶支座桥梁随墩高的增大呈先增大后减小的趋势,墩高引起残余位移变化是由于墩高的增大引起结构刚度降低,其自振周期逐渐加大,进而引起其震致残余位移的增大。剪跨比对于桥梁震致残余位移的影响基本呈正向关系,随着剪跨比的增大,残余位移值增大,仅当摩擦摆支座桥梁剪跨比大于 7 时呈下降

趋势。剪跨比对残余位移的影响是因为桥梁剪跨比的加大意味着桥梁上部质量增加,即桥梁的轴压比有所增大,增大的轴压比降低了结构的延性性能,会引起桥梁残余位移增大。

4 减隔震装置参数对残余位移影响

4.1 铅芯橡胶支座参数

铅芯橡胶支座本构模型为双线性模型,影响结构残余位移的因素主要取决于其进入非线性阶段的性质,所对应的两个重要表征指标为屈服力和屈服后刚度。因此,本文选取这两个参数进行铅芯橡胶支座隔震桥梁残余位移研究。

图5为铅芯橡胶支座参数对残余位移的影响。由图5可以看出:随着铅芯橡胶支座屈服力的增大,桥梁震致残余位移呈下降趋势,如图5(a)所示,当屈服力从300 kN增加至700 kN时,残余位移降低了56%,表明随着支座屈服力的增大,支座弹性段工作区间增长,相应塑性段减小,从而降低了支座的非线性变形,桥梁残余位移随之减小。桥梁残余位移值随铅芯橡胶支座屈服后刚度的增大而减小,如图5(b)所示,且屈服后刚度小于1000 N/mm时下降剧烈,随着屈服后刚度的增大,下降程度逐渐缓慢,屈服后刚度从750 N/mm增加至3000 N/mm时,残余位移降低了64%。这是因为,随着屈服后刚度的增大,对于拥有相同卸载刚度的铅芯橡胶支座而言,支座本身产生的塑性位移值下降,从而使得桥梁震后残余位移下降。

4.2 摩擦摆支座参数

摩擦摆支座和铅芯橡胶支座具有相同的本构模型,其屈服力和屈服后刚度主要受支座的摩擦因数和曲率半径影响。摩擦摆支座桥梁残余位移随着摩擦因数的增大有所降低,如图6(a)所示,当摩擦因数由0.03增加至0.07时,残余位移减小了26%。摩擦摆支座恢复力由重力分力提供,且在复位过程中会达到重力分力与摩擦力相等的一个平衡点,增大的摩擦因数降低了水平方向位移需求,残余位移有所降低。摩擦摆支座曲率半径从3 m增加至7 m时,残余位移增大了64%,如图6(b)所示,随着曲率半径的不断增大,摩擦曲面变得更为平缓,更趋于平面滑动隔震支座,由重力提供的恢复力也随之减小,残余位移逐渐增大。

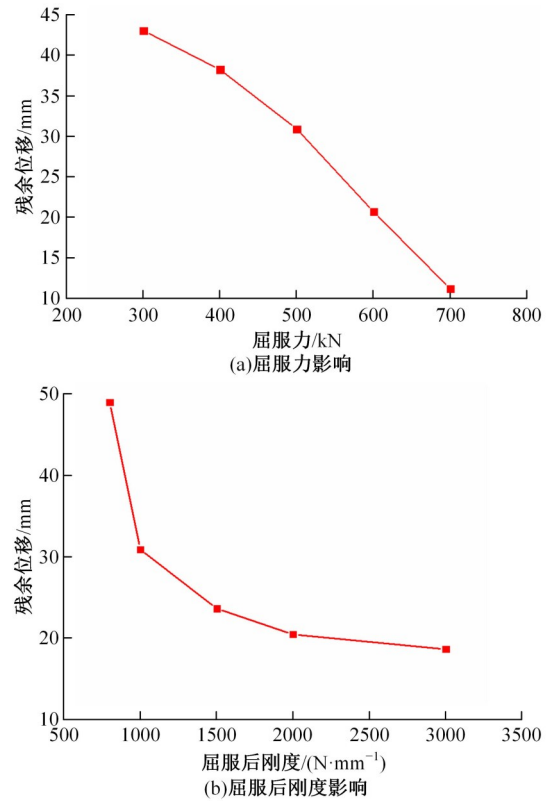


图5 铅芯橡胶支座参数对残余位移的影响

Fig. 5 Influence of lead rubber bearing parameters on earthquake-induced residual displacement

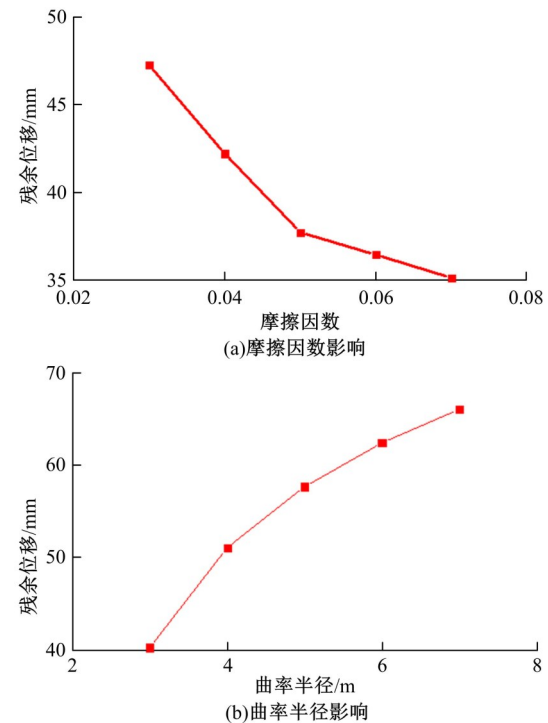


图6 摩擦摆支座参数对残余位移的影响

Fig. 6 Influence of friction pendulum bearing parameters on earthquake-induced residual displacement

4.3 黏滞阻尼器参数

黏滞阻尼器的阻尼系数 C 和速度指数 α 是两个重要参数,决定了黏滞阻尼器输出力的大小,也是影响桥梁震致残余位移的主要指标。本文基于 Fluent 建立了双出杆式孔隙黏滞阻尼器内部流体有限元分析模型,如图 7 所示,用于探讨黏滞阻尼器几何尺寸和硅油黏度与阻尼系数和速度指数的关系,进而确定黏滞阻尼器参数对桥梁残余位移的影响规律。

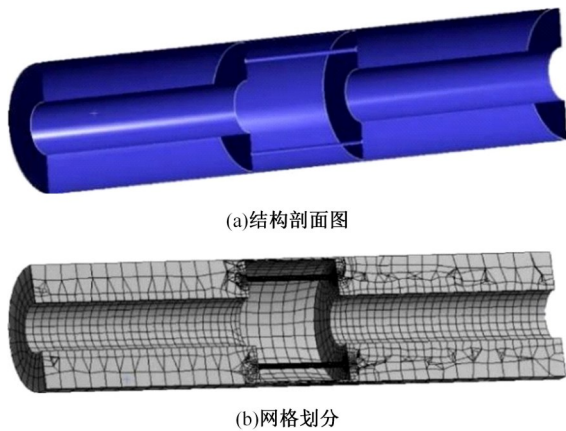


图 7 双出杆式孔隙黏滞阻尼器流体模型
Fig. 7 Fluid model of double-outlet rod type pore viscous damper

计算时先把流场的一侧设定为一个速度入口,由于输入能量为波动形式,所以将输入能量用输入流场的一个正弦速度进行简化表示,其方程为: $V = 0.1\pi \sin(4\pi t) \text{ m/s}$,数值大小随时间变化,速度从零到最大值的过程选择前 1/4 周期。

表 1 黏滞阻尼器几何尺寸、硅油黏度对应的阻尼系数和速度指数

Table 1 Geometric size of viscous damper and viscosity of silicone oil on damping coefficient and velocity index

参数	阻尼孔道长度/mm			阻尼缸体外径/mm				硅油黏度/ $10^{-3}(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$			
	70	110	130	100	120	140	160	1.5	2.0	2.5	3.0
$C/[\text{kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-\alpha}]$	3.131	5.057	7.919	3.131	4.886	4.084	5.104	7.213	9.067	10.720	12.340
α	1.204	1.15	1.108	1.204	1.146	1.223	1.227	1.107	1.113	1.121	1.127

黏滞阻尼器桥梁残余位移随阻尼系数和速度指数的变化情况如图 9 所示。由图 9 可以看出:当阻尼系数从 $2000 \text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\alpha$ 增大到 $6000 \text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\alpha$ 时,速度指数分别为 0.3、0.5、0.7 时,黏滞阻尼器桥梁残余位移分别下降了 9%、17% 和 20%。当阻尼系数分别为 2000 和 4000 $\text{kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\alpha$ 时,残余位移会随着速度指数的增大而增大,增幅分别为 11% 和 10%,而当阻尼系数为 $6000 \text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\alpha$ 时,残余位移会呈先略减小再增大的趋势。上述分别建立了黏滞阻尼器结构与

另一端设为压力出口,压力设置为零。通过计算得到黏滞阻尼器入口和出口处压强随时间变化的曲线,可计算瞬时输出阻尼力,得到阻尼力-速度曲线如图 8 所示,利用 Matlab 依据式(1)进行拟合,即可得到黏滞阻尼器阻尼系数和速度指数。

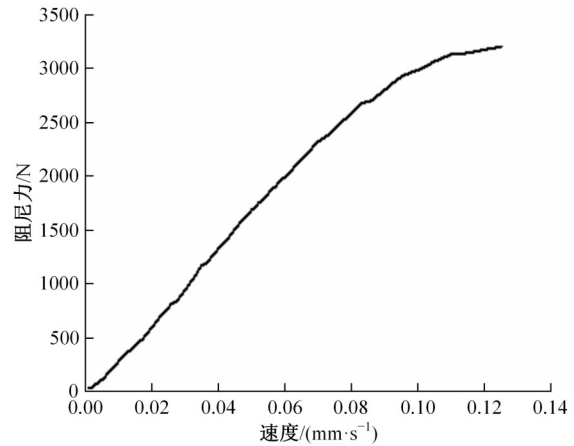


图 8 黏滞阻尼器力-速度图

Fig. 8 Force-velocity diagram of viscous damper

采用上述方法,分别取黏滞阻尼器阻尼孔长度为 70~130 mm,缸体外径为 100~160 mm,硅油黏度为 $1.5 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,计算得到各参数下阻尼力随时间的变化关系,拟合得到的黏滞阻尼器阻尼系数和速度指数如表 1 所示。结果表明,阻尼系数随各参数的增大而显著增大,但速度指数随各参数的改变变化不大,会随阻尼孔道长度增加、液缸外径减小和硅油黏度降低而略有减小。

阻尼系数和速度指数以及阻尼系数和速度指数与黏滞阻尼器桥梁残余位移的关系,基于以上分析结果,可通过调整黏滞阻尼器的几何尺寸和硅油黏度对桥梁残余位移进行控制。

针对以上研究结果,进行地震激励、结构参数、减隔震装置参数与桥梁震致残余位移相关程度的分析。将影响要素变化比例归一化,通过其对残余位移变化率的影响大小,确定二者之间的相关程度,如表 2 所示,研究结果可为桥梁残余位移控制和桥梁抗灾韧性提升提供理论依据。

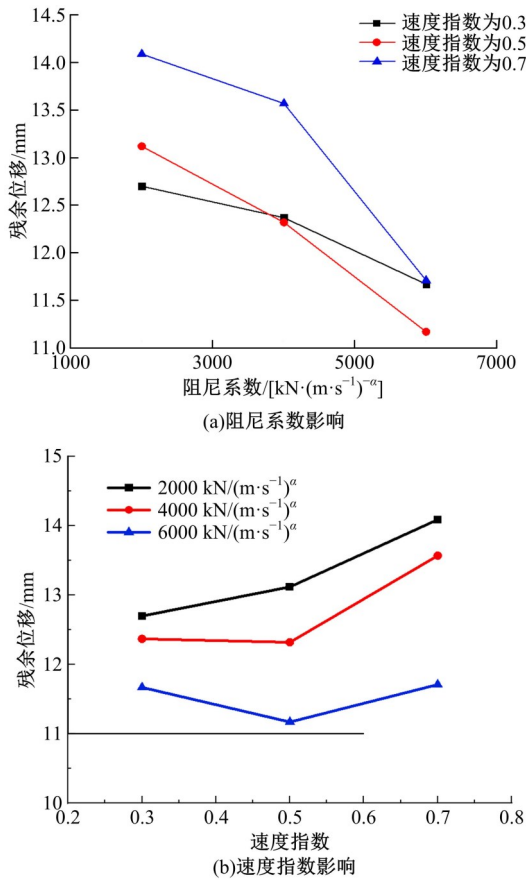


图 9 黏滞阻尼器参数对残余位移影响

Fig. 9 Influence of viscous damper parameters on earthquake-induced residual displacement

表 2 影响要素相关程度分析

Table 2 Analysis of correlation degree of influencing factors

要素相关程度	高	中	低
地震波种类	✓		
峰值加速度	✓		
持续时间			✓
墩高		✓	
剪跨比	✓		
屈服力		✓	
屈服后刚度		✓	
摩擦因数		✓	
曲率半径		✓	
阻尼系数			✓
速度指数			✓

5 结 论

(1)地震波的频谱特性对桥梁震致残余位移影响较大且对桥梁的减隔震装置形式较为敏感;随着地震波峰值加速度的不断增大,桥梁震致残余位移逐渐增大,摩擦摆支座和铅芯橡胶支座对

地震峰值加速度的敏感性更强,且当峰值加速度大于 $0.2g$ 时变化尤为显著;桥梁结构残余位移随地震动持续时间的增长而变大,但不明显。

(2)随着墩高的增加,结构刚度逐渐减低,其自振周期逐渐加大,进而引起减隔震桥梁震致残余位移的增加;随着剪跨比的增大,桥梁的轴压比有所增大,增大的轴压比降低了结构延性,残余位移也同时增大。

(3)消能减震装置参数的改变也会引起桥梁震致残余位移发生变化,随着铅芯橡胶支座屈服力的增大以及屈服后刚度的增大,残余位移有所下降;随着摩擦摆支座摩擦因数的增大和曲率半径的减小,残余位移有所降低;黏滞阻尼器桥梁的残余位移随着阻尼系数的降低和速度指数的增大而增大,可以采用增大阻尼孔长度、阻尼器液缸外径和硅油黏度的方式减小桥梁残余位移。

(4)对上述影响要素进行分析,结果表明残余位移对地震波种类、峰值加速度和剪跨比变化最为敏感;对墩高、铅橡胶支座屈服力、屈服后刚度、摩擦摆支座摩擦因数和曲率半径变化较为敏感;而对持续时间、黏滞阻尼器阻尼系数和速度指数变化敏感性最低。以上研究成果可为梁式桥震致残余位移控制及抗灾韧性提升提供理论依据。

参考文献:

[1] Bojorquez E, Ruiz G J. Residual drift demands in moment-resisting steel frames subjected to narrow-band earthquake ground motions[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2013, 42(11): 1583-1598.

[2] 王军文,李海洋,闫聚考,等.地震作用下钢筋混凝土桥墩残余位移研究[J].振动与冲击,2018,37(13):130-134.
Wang Jun-wen, Li Hai-yang, Yan Ju-kao, et al. Residual displacements of RC piers under action of earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 130-134.

[3] 曾武华,卓卫东,王东升. RC 桥墩残余位移指标影响因素分析及贝叶斯估计[J].振动与冲击,2021,40(19):145-150.
Zeng Wu-hua, Zhuo Wei-dong, Wang Dong-sheng. Influence factors analysis and bayesian estimation for residual displacement index of RC pie[J]. Journal of Vibration and shock, 2021, 40(19): 145-150.

[4] 余波,刘迪,杨绿峰.考虑 P-Δ 效应的桥梁结构震

- 后概率残余位移分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(1): 154-161.
- Yu Bo, Liu Di, Yang Lv-feng. Probabilistic residual displacement analysis of bridge structures considering P- Δ effect[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(1): 154-161.
- [5] 孙治国, 张振涛, 伍隋文, 等. 考虑 PSSI 的桩柱式桥墩震后残余位移分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(3): 684-694.
- Sun Zhi-guo, Zhang Zhen-tao, Wu Sui-wen, et al. Analysis on the residual displacement of extended pile-shafts considering pile-soil-structure interaction (PSSI) after earthquakes[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(3): 684-694.
- [6] 申纪创. 中小跨径梁式桥地震残余位移分析与控制方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学土木工程学院 2016.
- Shen Ji-chuang. Analysis and control method of seismic residual displacement of small and medium-span beam bridge[D]. Chongqing: School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [7] Lioussatou E, Fardis MN. Residual displacements of RC structures as SDOF systems[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2015, 44(5): 713-734.
- [8] 张艳霞, 黄威振, 刘安然, 等. 自复位免修复摩擦耗能支撑性能研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 136-146.
- Zhang Yan-xia, Huang Wei-zhen, Liu An-ran, et al. A study on the behavior of self-centering and free-repair braces with friction dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 136-146.
- [9] 李刚, 王甲飞, 胡雪飞. 自复位变摩擦阻尼器有限元分析[J]. 结构工程师, 2020, 36(5): 66-73.
- Li Gang, Wang Jia-fei, Hu Xue-fei. Finite element analysis of self-resetting variable friction damper[J]. Structural Engineer, 2020, 36(5): 66-73.
- [10] 刘云帅, 韩建平. 自复位单向摩擦阻尼器梁桥数值模拟及混合试验[J]. 土木工程学报, 2020(增刊 2): 294-300.
- Liu Yun-shuai, Han Jian-ping. Numerical simulation and hybrid test of the girder bridge with self-centering unidirectional friction damper[J]. China Civil Engineering Journal, 2020(Sup. 2): 294-300.
- [11] 马永涛, 龙晓鸿, 陈兴望, 等. SMA-LRB 复合型支座隔震连续梁桥地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(3): 95-103.
- Ma Yong-tao, Long Xiao-hou, Chen Xing-wang, et al. Seismic fragility analysis of continuous girder bridges with SMA-LRB [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(3): 95-103.
- [12] 杨毅. SMA-FPS 复合支座及其在连续梁桥中的隔震研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2017.
- Yang Yi. Research on SMA-FPS composite bearing and seismic isolation to continuous bridge under earthquakes[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2017.
- [13] Taylor D P, Metzger J C. Structural control using functionally upgraded spring-damper isolator having integral gapping elements[C]//Structures Congress, Texas, USA, 2009: 850-859.