

DOI:10.11918/201907150

缓冲型拉索减震支座拟静力试验及减震效果分析

王征南,谷屹童,沈国煜,袁万城

(土木工程防灾国家重点实验室(同济大学),上海 200092)

摘 要: 为了能够更有效地解决桥梁在地震中的力与位移平衡的问题,结合拉索减震支座的构造特点,提出了缓冲型拉索减震支座的构想,介绍了其工作原理以及实现方式,对常规拉索减震支座及缓冲型拉索减震支座进行拟静力试验,并将试验结果进行对比研究. 在试验结果的基础上提出了缓冲型拉索减震支座的数值模拟方法,并验证了所提方法的正确性. 最后,针对一座实际的连续梁桥,选用 3 条近场脉冲型地震波,分析采用拉索减震支座以及缓冲型拉索减震支座下的支座减震效果. 结果表明:相比于拉索减震支座,采用缓冲型拉索减震支座可以使结构的峰值支座位移、墩底最大弯度以及残余位移均有不同程度的降低,具有更好的限位能力和自复位能力.

关键词: 桥梁抗震;缓冲型拉索减震支座;拟静力试验;数值模拟

中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)09-0039-06

Quasi-static test on buffer cable sliding friction aseismic bearing and analysis of its seismic performance

WANG Zhengnan, GU Yitong, SHEN Guoyu, YUAN Wancheng

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

Abstract: To achieve a balance between force and displacement of bridges under earthquakes, a buffer cable sliding friction aseismic bearing (BCSFAB) was proposed on the basis of cable sliding friction aseismic bearing (CSFAB). The concept and the working mechanism of BCSFAB were introduced. A quasi-static test was carried out on CSFAB and BCSFAB, and test results were compared. Then, the numerical simulation method for BCSFAB was proposed and validated. Finally, by taking a continuous girder bridge as the research object, the seismic performance of BCSFAB and CSFAB under three near-field pulse-type waves was analyzed respectively. Results show that compared with CSFAB, BCSFAB performed better in reducing the peak displacement of bearing, maximum bending of pier bottom, and residual displacement of the structure, which has better limiting ability and self-centering capacity.

Keywords: seismic design of bridge; buffer cable sliding friction aseismic bearing; quasi-static test; numerical simulation

减隔震支座除了应当满足在正常使用荷载下的要求之外,在地震作用下还应当具有一定的位移控制能力和自复位能力^[1]. 目前,具有自复位功能的减隔震支座主要有以下几类:铅芯橡胶支座(LRB)、钟摆式摩擦隔震支座(FPS)、增设额外回复力装置的支座. 铅芯橡胶支座在各种隔震支座中使用最为广泛,其滞回模型、参数取值和等效线性化等方面的研究也非常成熟,但是,铅芯橡胶支座的竖向承载力低,在大跨度桥梁万吨级的恒载作用下难以胜任. FPS 支座其特有的圆弧滑动面使其具有自复位功

能^[2],但其主要缺陷是上部结构沿着弧型滑动面运动时产生一定量的上升位移,当连续梁体系墩高差异较大时,各墩的不同上升位移将导致梁体产生不同的支座沉降. 依靠形状记忆合金(SMA)独特的滞回特性,SMA 丝^[3]可以与普通支座组合成一种新的减隔震支座系统,该支座系统具有良好的复位能力,但由于 SMA 价格昂贵且特性受温度影响较大,限制了其在实际工程中的大规模使用. 滑动摩擦类支座具有较大的竖向承载能力、良好的隔震性能和较低的造价,是理想的隔震支座^[3],然而由于自身不具备自复位能力,地震作用下摩擦支座的残余位移较大. 拉索减震支座是将球钢支座与限位拉索组合而成的减隔震支座^[4-5],继承了滑动摩擦类支座的全部优点,通过理论分析及试验证明,使用拉索减震支座能够有效降低桥梁在地震作用下的结构响应,且能够有效限制墩梁的最大相对位移,防止落梁震害

收稿日期:2019-07-18

基金项目:土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE19-B-19);
国家自然科学基金(51778471,51978512);
山东省交通运输科技计划(2017B75)

作者简介:王征南(1987—),男,博士研究生;
袁万城(1960—),男,教授,博士生导师

通信作者:袁万城,yuan@tongji.edu.cn

的发生^[6-10].

随着近场脉冲型地震造成严重震害越来越多,针对近场脉冲型地震的抗震研究越来越受到人们关注^[11-12]. 为提高拉索支座在近场脉冲型地震下的抗震性能,增强拉索减震支座控制结构响应能力、自复位能力,本文提出了在拉索减震支座基础上进行改良得到缓冲型拉索支座本构的理念与基本构想,通过在拉索支座的基础上引入了“拉索-弹簧”缓冲系统,对该理念进行了实现,并通过拟静力试验进行了验证;同时提出了该支座的数值模拟方法,并通过对比试验数值与理论分析结果,验证了理论模型的正确性;最后针对一座实际的连续梁桥,选用 3 条近场脉冲型地震波,分析采用拉索支座以及缓冲拉索支座下的支座减震效果,对比分析缓冲型拉索减震支座的抗震效果.

1 缓冲型拉索支座

1.1 基本构想

缓冲型拉索减震支座 (BCSFAB) 的基本构想是在拉索减震支座的基础上,在到达拉索自由程前,提供一个缓冲刚度 K_2 (见图 1), 目的是在结构经历长周期脉冲地震时,当上部结构发生相对于下部结构的持续的、单向的运动时,在支座变形达到拉索自由程前,缓冲刚度 K_2 提供自复位能力,避免上部结构的持续加速,减小支座变形达到拉索自由程时上部结构的相对速度. 避免拉索突然绷紧产生的上部结构加速度激增. 缓冲拉索支座在发挥限位功能的同时,减小因限位作用产生的上部结构惯性力. 将传递至下部结构的惯性力控制在可接受范围内.

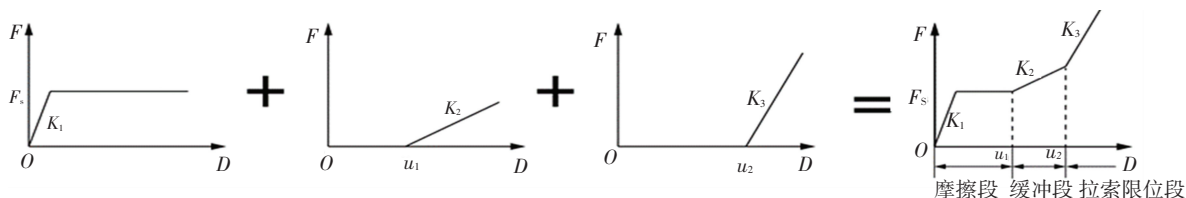


图 1 缓冲拉索减震支座本构设想

Fig.1 Constitutive model of BCSFAB

1.2 缓冲型拉索支座本构的实现

为了实现预期的本构关系,在连通式拉索减震支座结构形式的基础上,引入了“拉索-弹簧”缓冲系统,得到新型缓冲型拉索减震支座,如图 2 所示,其具体说明如下: 1) 拉索采用半连通形式,且单根拉索在支座两侧露出的部分采用不等长布置方式,同时相邻两根拉索长短侧要交错布置,更好地实现支座左右侧的对称; 2) 拉索的两端固定在支座的下底板边缘处,同时在索中间部位设置锚固装置; 3) 在支座的上座板设计拉索通道,布置拉索和弹簧,拉索穿过弹簧,拉索中部锚环与弹簧一端接触; 4) 在上座板孔道中,弹簧一端与支座上座板的端板接触,另一端与拉索中部的锚环接触.

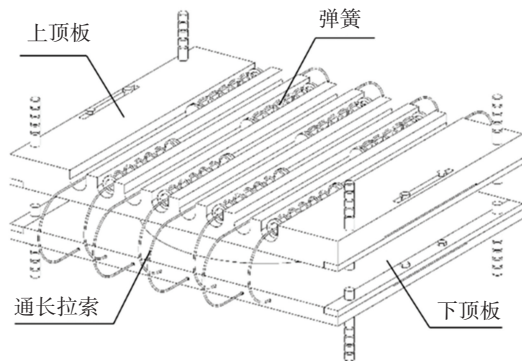


图 2 缓冲拉索支座三维轴测图

Fig.2 3D axonometric drawing of BCSFAB

1.3 缓冲型拉索支座工作原理

采用拉索-弹簧系统的原因是:通过这样的布置方式,利用拉索与上支座板孔道的相对运动,在支座达到最大设计变形前,由弹簧为支座提供侧向刚度,增加支座的自复位能力. 其工作原理示意图见图 3, 其中 a 为不等长布置拉索短边长度, b 为不等长布置拉索长边长度, h 为上、下座板孔道间距, u_1 为摩擦段长度, u_2 为自由程长度 (摩擦段长度 + 缓冲段长度). 缓冲型拉索支座工作原理具体如下: 1) 初始状态下,弹簧与拉索处于自然状态,如图 3(a) 所示. 此时支座处于摩擦段,弹簧和拉索均不受力,支座本构与球钢支座本构一致; 2) 当支座变形到达 u_1 时,短端拉索首先绷紧,如图 3(b) 所示,支座开始进入缓冲段,此阶段不等长布置的拉索出现长度的自动调整,拉索通过上座板孔道由长端向短端移动,在拉索移动过程中压缩孔道中的弹簧,支座侧向刚度增加; 3) 当不对称布置的拉索自动调整至支座两端拉索长度相等时 (支座的变形为 u_2) 缓冲段结束,支座进入拉索限位段,如图 3(c) 所示. 此时支座侧向刚度由拉索提供; 4) 在支座变形从最大设计值恢复到 0 的过程中,被压缩的弹簧会逐渐恢复到自由长度,同时推动拉索中部锚环,带动支座两端等长状态的拉索恢复到初始不对称布置状态.

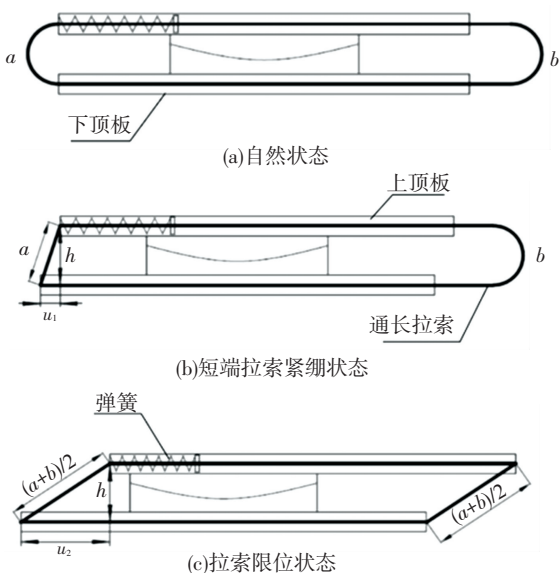


图 3 缓冲拉索支座工作原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of working principle of BCSFAB

2 缓冲拉索支座拟静力试验

2.1 试验简介

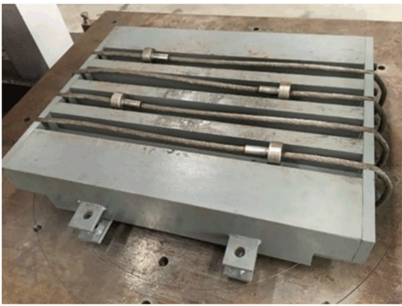
为了验证所提出的拉索-弹簧缓冲机构的可行性,本文通过拟静力试验,模拟地震作用下的循环加载与卸载过程,观察记录该过程中缓冲拉索减震支座表现出的力学特性,通过对比实验结果与理论分析结果,为缓冲拉索减震支座的进一步参数分析及实际工程应用提供依据。

该试验所用的缓冲型拉索减震支座是在 QZ4000DX 型球钢支座基础上进一步加工制作而成的。其设计竖向承载力为 4 000 kN,自由程长度为 100 mm,支座整体高度为 200 mm,支座顶面尺寸为 616 mm×850 mm。

图 4 为试验对象足尺缓冲拉索减震支座实拍图,其构造主要包括一个常规单向活动球钢支座、两侧挡板、弹簧以及限位拉索。支座摩擦面材料为镜面不锈钢和聚四氟乙烯板,采用硅脂作为润滑剂。弹簧布置在上支座板的孔洞中,弹簧一端与上弹簧挡板接触,另一端与拉索中的挡块接触。拉索通过特殊设计,穿过上支座板以及弹簧,两端插入下支座板预留的孔洞中。通过螺栓将挡板固定在上下支座板的侧面,分别为弹簧提供反力及限位拉索。支座共有 4 根限位拉索,拉索材料为 $\phi 12$ 钢丝绳。支座设计自由程为 100 mm,吨位为 400 t。拉索-弹簧缓冲系统如图 5 所示。本试验采用的加载系统是 YJW-20000 微机控制电液伺服压剪试验系统(见图 5)。该系统竖向最大承载为 20 000 kN,水平最大承载为 3 000 kN。拟静力试验的总体布置如图 6 所示。



(a) 上顶板侧



(b) 下顶板侧

图 4 缓冲型拉索减震支座试验模型

Fig.4 BCSFAB test model



(a) 整体图



(b) 加载图

图 5 YJW-2000 剪压试验机

Fig.5 Photos of YJW-2000 shear compression testing machine

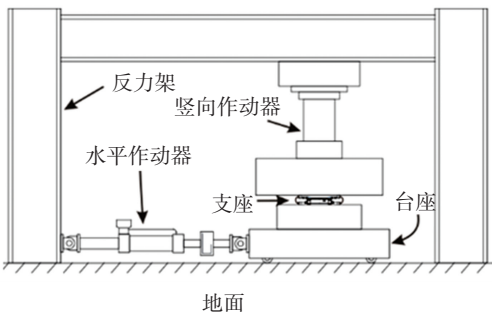


图 6 拟静力试验总体布置

Fig.6 General layout of quasi-static test

为了对比常规拉索支座与本文所提出的缓冲型拉索支座本构,本试验分别对无弹簧的拉索支座以及弹簧缓冲段长度为 200 mm 的缓冲型拉索支座进行拟静力试验。在试验过程中,竖向荷载保持 4 000 kN 恒定,水平荷载采用变幅、等幅混合位移控制的加载方

式,如图 7 所示,每级做 3 次加载循环,加载波形采用尖波. 0~90 mm 为等幅位移控制加载,每 15 mm 为一级,平均加载速率为 4 mm/s;之后每级递增 5 mm,位移幅值为 95、100,加载速率为 1 mm/s.

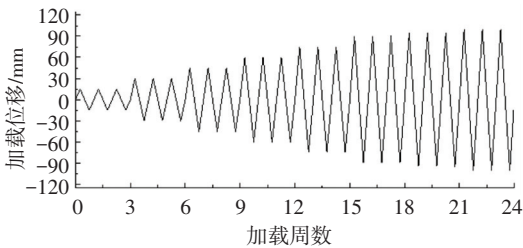


图 7 加载制度

Fig.7 Loading system

2.2 试验结果

图 8 为常规拉索支座滞回图. 当支座位移小于 80 mm 时,支座处于滑动阶段,即支座仅仅表现出普通滑动摩擦型支座的特性,支座并未出现任何限位特性. 当试验侧向位移加载至 91 mm 时,拉索侧向限位力达到 90 kN,此时试验停止. 此支座滞回图表明,拉索减震支座在支座位移超过设计自由程后,限位效果明显.

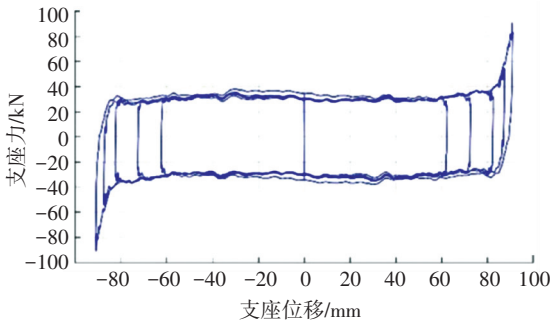


图 8 常规拉索支座滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves of CSFAB

图 9 所示为缓冲型拉索支座滞回图. 在支座位移小于 20 mm 阶段,支座处于滑动阶段,即支座仅仅表现出普通滑动摩擦型支座的特性,支座并未出现任何限位特性. 当支座位移达 20 mm,不对称布置

短侧拉索拉紧并开始压缩弹簧,支座进入缓冲段. 支座位侧刚度增加,且呈现几何非线性. 支座最大变形达到 88 mm,达到支座拉索限位段.

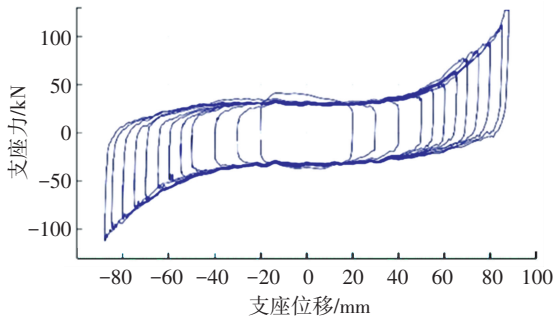


图 9 缓冲型拉索支座滞回曲线

Fig.9 Hysteresis curves of BCSFAB

根据试验结果,可以发现:1) 缓冲型拉索减震支座在摩擦段滞回环较为饱满,与球钢支座有同样的摩擦耗能力. 2) 试验中交错布置的不等长拉索在支座变形增大的过程中能够随着支座位移的增大自动调整压缩弹簧并提供可观的耗能力与恢复力. 采用弹簧的缓冲拉索支座能够在支座拉索限位段前提供有效的缓冲段,缓冲段行程与设计值较为吻合. 3) 根据试验结果的对比,基本实现了最初关于缓冲型拉索减震支座的力学本构模型的设想,同时也证明了这种通过添加缓冲弹簧增强支座性能的可行性.

2.3 拟静力试验的数值模拟

本文提出的缓冲型拉索减震支座的数值模拟方法如图 10 所示,其本质是一个摩擦滑动支座和拉索-弹簧缓冲系统的组合结构,在数值模拟中,将摩擦部分和缓冲部分分别模拟,再进行并联,从而得到模拟缓冲拉索减震支座. 数值模拟采用了 OpenSees 有限元软件平台,球钢支座部分采用 FlatSliderBearing 单元进行模拟,拉索-弹簧系统部分采用 ElasticMultiLinear 材料模拟,并将两个单元并联,最终得到缓冲拉索减震支座的数值模型. 本试验的模型参数见表 1.

表 1 有限元模型参数

Tab.1 Finite element model parameters

$K_1 / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	μ	$K_s / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_c / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	Δ_1 / mm	Δ_2 / mm
20 000.0	0.014	353.0	94 222.0	20.0	82.0

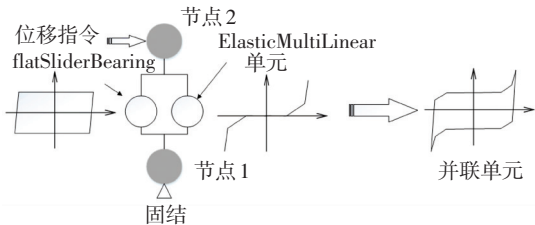


图 10 缓冲型拉索减震支座数值模拟方法

Fig.10 Numerical simulation method for BCSFAB

本文对上一节中所述缓冲型拉索支座进行了多次位移幅值不同的拟静力试验,并用本节所提处的数值模拟方法进行模拟,图 11 对比了数值模型与实际试件的滞回曲线. 从理论与试验数据的对比中可以发现,本文模拟方法可以很好地模拟缓冲拉索支座在 3 个阶段的力学特性. 尤其是在在缓冲阶段,当支座位移增大时,实验数值与理论值拟合较好.

因此,本文采用的模拟方法可以很好地模拟缓冲拉索减震支座的力学本构与动力行为. 同时也为接下

来的缓冲拉索支座减震效果的分析奠定了基础.

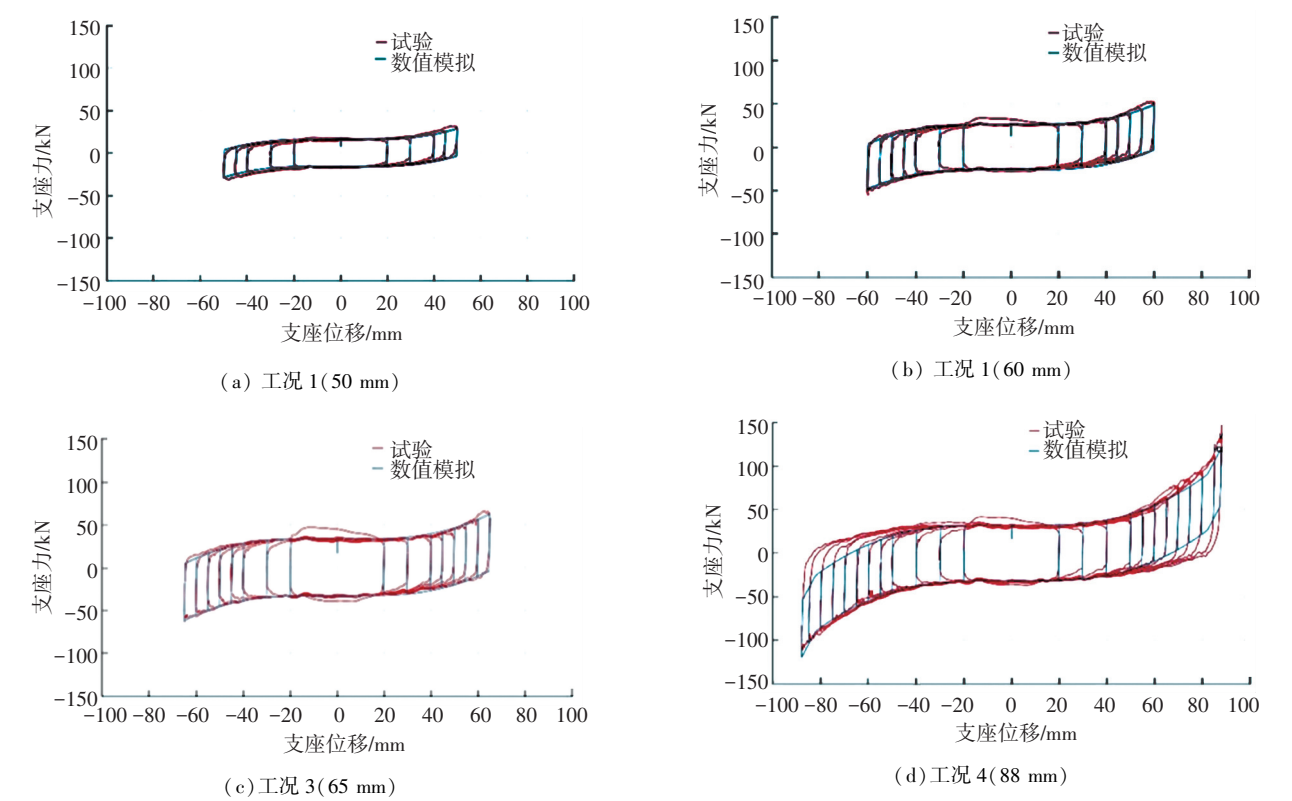


图 11 数值模拟滞回曲线与试验结果对比

Fig.11 Comparison of numerical simulation hysteresis curves and test results

3 缓冲拉索支座桥梁减震效果分析

本节以一跨径布置为 56 m+93 m+56 m 的三跨连续梁桥为研究对象,应用 OpenSees 有限元分析软件,通过对比采用缓冲型拉索减震支座及常规拉索支座时两种工况的地震响应,分析缓冲型拉索减震支座减震效果. 桥梁结构过渡墩墩高为 4.912 m,墩底纵向抗弯惯矩为 0.562 5 m⁴,截面面积为 3 m²,主墩墩高为 3.6 m,墩底纵向抗弯惯矩为1 123.03 m⁴,截面面积为 49.5 m². 边墩位置两种工况分别放置自由程为 0.25 m、缓冲段长度为 0.15 m 的缓冲型拉索支座以及自由程为 0.25 m 的连通式拉索支座,中墩位置设置球钢支座. 其中,主梁和桥墩用 Elastic Beam Column 单元模拟(假定桥墩不发生塑性变形),桩基础采用等效的土弹簧单元模拟桩-土的相互作用,球钢支座采用 elastic-perfectly plastic material 进行模拟,弹簧-拉索采用并联两个 elastic-perfectly plastic gap material 进行模拟. 有限元模型见图 12. 地震波输入采用实际强震中记录下的地震波进行桥梁结构顺桥向的地震反应时程分析,选取 3 条具典型脉冲特点的地震波作为输入,地震波的详细信息见表 2.



图 12 三跨连续梁桥有限元模型

Fig.12 Finite element modeling of the three-span continuous girder bridge

表 2 选取的地震波

Tab.2 Selected seismic ground motions

地震名称	时间	观测站台	震级	PGA/ g
Northridge	1994 年	Sylmar-Converter Sta.E.	6.7	0.85
Kocaeli	1999 年	Gebze	7.4	0.28
Chi-Chi	1999 年	TCU068	7.6	0.61

通过有限元分析,得到桥梁的边墩支座位移及边墩墩底弯矩,地震响应时程图如图 13~15 所示. 首先从结构地震响应峰值的角度分析,采用缓冲型拉索减震支座后,在 Chi-Chi 波作用下,支座峰值位移以及墩底峰值弯矩均减小 15%左右;在 Kocaeli 波作用下,支座峰值位移减小 10%,墩底峰值弯矩减小 20%;在 Northridge 波作用下,支座位移峰值减小 10%,且墩底最大弯矩降低幅度为 30%. 从上述结果可以看出,采用缓冲型拉索支座可以使桥梁墩底弯矩有较大幅度的降低(15%~30%),同时使支座峰

值位移也有一定程度的减小(10%~15%)。从残余位移的角度分析,采用缓冲型拉索减震支座后,桥梁支座残余位移在 3 条地震波下均显著的降低,这说明引入“拉索-弹簧”缓冲系统,可以使摩擦型支座具有一定的恢复力的作用。

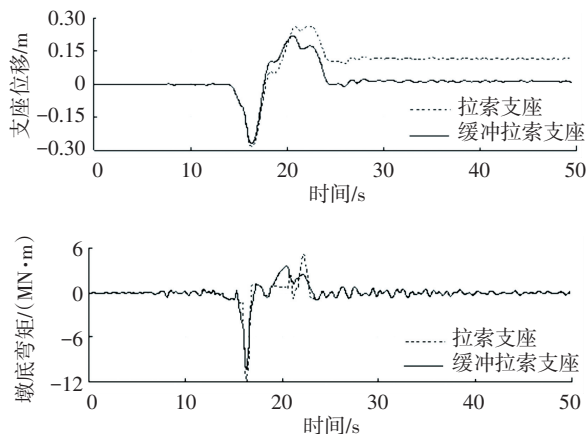


图 13 Chi-Chi 波作用下地震响应时程

Fig. 13 Seismic response time history under Chi-Chi ground motion

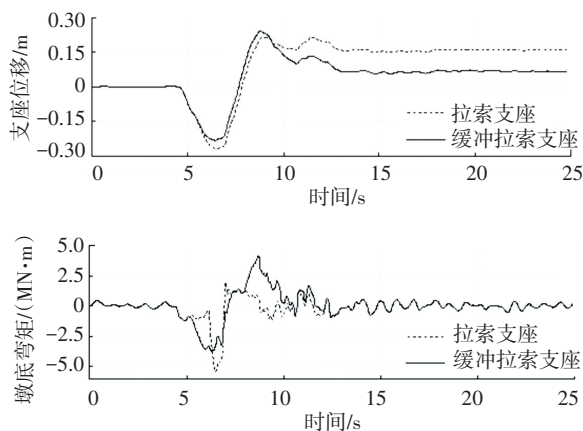


图 14 Kocaeli 波作用下地震响应时程

Fig. 14 Seismic response time history under Kocaeli ground motion

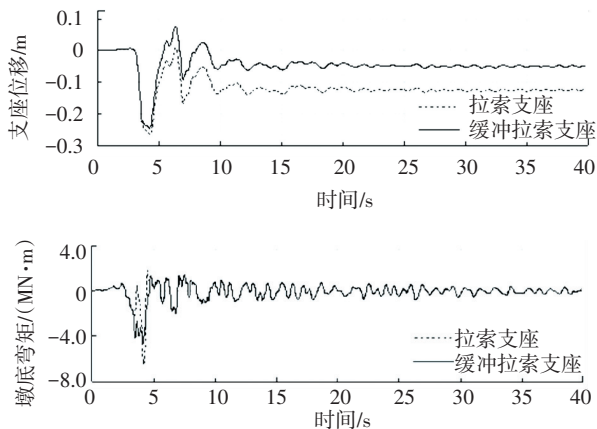


图 15 Northridge 波作用下地震响应时程

Fig. 15 Seismic response time history under Northridge ground motion

综合上述分析可知,使用缓冲型拉索支座可以更好地处理桥梁结构在地震作用下力与位移的平衡关系,既可以避免地震来临时落梁震害的发生,也可以显著减小结构的地震破坏,同时增强了结构抵抗多次地震的能力,并且有利于震后修复工作的进行。

4 结 论

1) 提出了缓冲型拉索支座的理念及实现方法,并通过拟静力试验对其进行了验证,同时应用有限元软件对缓冲型拉索减震支座的本构关系进行模拟,并比较了地震作用下缓冲型拉索减震支座与常规拉索减震支座的减震效果。

2) 在缓冲型拉索支座的实现方法中,交错布置不等长拉索可以调整压缩弹簧并提供可观的恢复力,采用弹簧能够在拉索减震支座拉索限位段前提供有效的缓冲段。

3) 在 OpenSees 中通过并联 FlatSliderBearing 单元模拟的球钢支座部分和使用 ElasticMultiLinear 材料模拟的拉索-弹簧系统部分,可以准确模拟缓冲拉索减震支座的力学特性。

4) 缓冲型拉索减震支座符合地震作用下力与位移平衡的工作原理,具有良好的限位能力和自复位能力,可以有效防止落梁等震害的发生,并且有利于震后修复工作的进行。

5) 在拉索支座的基础上引入了“拉索-弹簧”缓冲系统,进一步提高拉索支座的设计自由度和应用范围,且在震后可以单独更换“拉索-弹簧”系统,这种新型的组合装置系统的应用和推广将具有更强的性能与成本优势。

参考文献

- [1] AASHTO. Specifications for LRFD seismic bridge design [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007
- [2] 王江波,贺金海,袁万城. 近场地震作用下采用拉索减震支座桥梁纵向地震响应特性[J]. 结构工程师, 2012, 28(5): 83
WANG Jiangbo, HE Jinhai, YUAN Wancheng. Influence of near-fault ground motion characteristics on seismic responses of continuous beam bridges using cable-sliding friction aseismic bearing[J]. Structural Engineers, 2012, 28(5): 83. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2012.05.014
- [3] CARDONE D, DOLCE M, PONZO F C. The behaviour of SMA isolation systems based on a full-scale release test [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2006, 10(6): 815. DOI: 10.1080/13632460609350619
- [4] 袁万城,韦正华,曹新建,等. 拉索减震支座及桥梁抗震设计应用研究[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊2): 204
YUAN Wancheng, WEI Zhenghua, CAO Xinjian, et al. Cable-sliding friction aseismic bearing and its application in bridge seismic design[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S2): 204

(下转第 84 页)