

规则连续梁桥质量转动缠绕索装置减震效果及影响参数研究

刘延芳^{1,2}, 张文学¹, 杜修力¹, 鲍卫刚²

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中国交通建设股份有限公司, 北京 100088)

摘要: 为解决连续梁桥纵向地震惯性力仅由固定墩承受的抗震设计难题, 充分发挥与固定墩相同截面的活动墩的抗震潜能, 基于缠绕索原理, 研发了利用附加质量惯性力的质量转动缠绕索装置, 从而实现固定墩与活动墩协同受力和限制梁端相对位移的目的。在阐述装置工作原理及构造特点的基础上, 提出了装置的恢复力模型, 并通过对一座三跨规则连续梁桥建立全桥有限元模型, 研究了连续梁桥质量转动缠绕索装置的减震效果, 系统分析了附加质量、摩擦系数和初始松弛系数取值对装置减震性能的影响。结果表明, 质量转动缠绕索装置对于减小固定墩地震响应, 提升活动墩参与连续梁桥纵向整体协同受力的效果较为明显, 值得注意的是, 不同地震波作用下减震装置参数对结构地震响应的影响略有不同。

关键词: 连续梁桥; 质量转动缠绕索装置; 减震效果; 附加质量; 摩擦系数; 初始松弛系数

中图分类号: U441⁺.3; U442.5⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)11-1818-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.11.003

引言

连续梁桥具有内力状态均匀合理、刚度大、整体性好等优点。但由于连续梁桥通常仅在一联中设置一个固定支座, 依靠固定支座与固定墩承受桥梁上部结构纵向地震惯性力, 导致连续梁桥在地震作用下常会发生支座损坏、固定墩损伤等震害。2008 年汶川地震中的多座连续梁桥^[1-9]、2021 年青海玛多地震中的野马滩大桥、野马滩 2 号桥^[10]等连续梁桥均发生了较为严重的震害。随着减/隔震技术在实际工程中的推广, 新西兰、美国、日本等国家逐步将减/隔震技术写入了规范中^[11-15]。文献[16]中明确提出了连续梁桥采用减/隔震支座的抗震体系设计, 为桥梁减/隔震设计提供了规范依据和设计指导。

对于采用减/隔震支座的连续梁桥^[17-20], 淡化了固定支座与活动支座的作用, 通过减/隔震支座的初始刚度来满足正常运营荷载作用下的纵向限位要求; 同时在地震作用下, 可以通过合理设置减/隔震支座参数, 使得每个桥墩的纵向组合刚度得以均衡, 各墩可以共同协调、分担纵向水平地震力, 从而改变地震力集中于固定墩的不利情况。但由于减/隔震

支座的等效刚度与固定支座的差异性, 每个桥墩的纵向组合刚度难以均衡, 导致活动墩的抗震潜能并未得到充分发挥。同时, 减/隔震支座成为整个结构抗震性能的保障, 也成了结构抗震设计的薄弱环节。鉴于各类减/隔震支座的缺陷以及震后支座更换的时效性, 难以保障结构的合理抗震性能以及震后性能的快速恢复。另外, 强震作用下, 桥梁结构容易进入强非线性阶段, 采用非线性减/隔震支座会导致结构多重非线性的耦合现象, 使得减/隔震支座的动力失效机制及破坏模式更为复杂, 如何确保结构具有合理的抗震性能, 确保桥梁结构“大震不倒”仍有待进一步研究。

本文以发挥活动墩抗震潜能, 提升连续梁桥纵向整体协同受力性能为目标, 基于缠绕索原理, 提出一种在连续梁主梁与活动墩之间设置通过地震加速度激发的质量转动缠绕索装置。根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)^[21]中对规则桥梁的定义, 以一座典型 3 跨规则连续梁桥为例, 分析了质量转动缠绕索装置的协同受力和减震耗能的效果, 同时研究了质量转动缠绕索装置关键设计参数对减震效果的影响。

1 工作原理及力学模型

1.1 缠绕索力学原理

将绳索在粗糙的木桩上缠绕几圈后,可以很省力地拉住物体,如船只通过绳索缠绕在码头木桩上停泊。18世纪数学家欧拉研究了摩擦力与绳索缠绕在木桩上的圈数之间的规律,构建了欧拉公式^[22],即以木桩上一小段绳索为研究对象,根据共点力的平衡原理,可以求解出:

$$f_{\mu} = F_1 (e^{2\pi\mu n} - 1) \quad (1)$$

$$F_2 = F_1 e^{2\pi\mu n} \quad (2)$$

式中 f_{μ} 为缠绕索摩擦力; F_1 为缠绕索主动端拉力; F_2 为缠绕索被动端拉力; μ 为缠绕索与圆柱体间的滑动摩擦系数; n 为缠绕圈数。

1.2 工作原理及构造特点

本文基于缠绕索原理,提出了一种地震加速度激发的质量转动缠绕索装置。该装置设置在连续梁活动墩处,可与活动支座一起工作。在常规荷载作用下,通过设置合理的缠绕索的初始松弛量,满足结构在正常运营状态下温度荷载等引起的缓慢变位的需求。在地震作用下,以转动轴两端附加质量块的转动惯性力作为缠绕索主动端的拉力,通过缠绕索的放大作用实现较大的滑动摩擦力。当主梁与活动支座之间的地震惯性力小于附加质量块的转动惯性力和其所激起的缠绕索摩擦力的组合时,装置达到瞬间锁定的连接状态,实现固定墩与活动墩共同分担纵向地震惯性力和限制梁端位移的作用。当主梁与活动支座之间的地震惯性力大于附加质量块的转动惯性力和其所激起的缠绕索摩擦力的组合时,活动墩将以缠绕索所提供的最大摩擦力与固定墩协同受载并限制活动墩与梁体之间的相对位移,从而起到保护活动支座和伸缩缝的目的。该装置的构造如图 1 所示,其主要构成部分包括转动轴、附加质量块、缠绕索、摩擦轴、装置垫板、支架板、牛腿以及组装螺栓等。

1.3 恢复力模型

基于缠绕索的力学原理,结合装置初始惯性力的取值方法,质量转动缠绕索装置的本构方程如下:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & |d| < g_p \\ \frac{F_s}{\Delta} (|d| - g_p), & g_p + \Delta > |d| \geq g_p \\ F_s, & |d| > g_p + \Delta \end{cases} \quad (3)$$

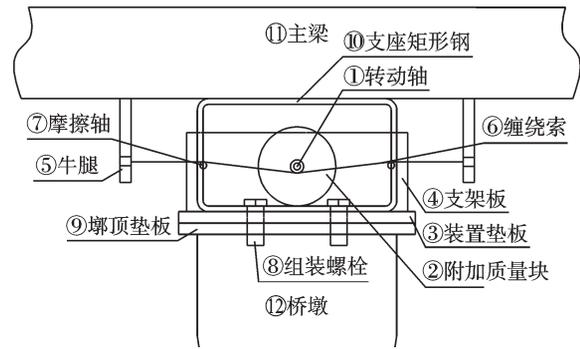


图 1 质量转动缠绕索装置构造图

Fig. 1 Mass rotation wrap rope device construction diagram

式中 d 为活动墩处墩梁的相对位移; g_p 为初始松弛量; Δ 为绳索的最大伸长量; $F_s = F_2 = \beta m a e^{2\pi\mu n}$ 为附加质量块的初始惯性力所激起的缠绕索被动端拉力,其中, m 为附加质量, a 为附加质量块的转动加速度, $\beta = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2r_z^2}$ 为质量放大系数 (r_1, r_2 为附加质量的内、外环半径, r_z 为转动轴半径)。

图 2 为质量转动缠绕索装置的恢复力曲线。

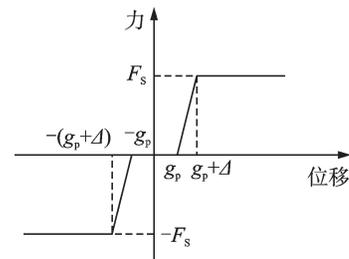


图 2 恢复力模型

Fig. 2 Model of restore force

2 计算模型

本文选取一座跨径布设为 (45+80+45)m 的三跨变截面连续梁桥为例,对质量转动缠绕索装置的减震性能以及相关参数对减震性能的影响规律进行分析。分析中不考虑结构的塑性变形,利用质量转动缠绕索装置和常规盆式支座的恢复力模型考虑活动支座处的非线性。质量转动缠绕索减震装置的有限元模型通过集中质量法考虑附加质量的影响。

该桥主梁采用单箱单室直腹板混凝土箱形截面,标准截面如图 3 所示。墩顶处梁高 4.3 m,高跨比为 1/16.7;跨中梁高 2.3 m,高跨比为 1/34.8;顶板宽 12.5 m,厚 0.28 m;底板宽 6.5 m,厚 0.28 m;腹板厚 0.5~0.7 m。桥墩墩高 15 m,采用 6.5 m × 2 m 的矩形截面。

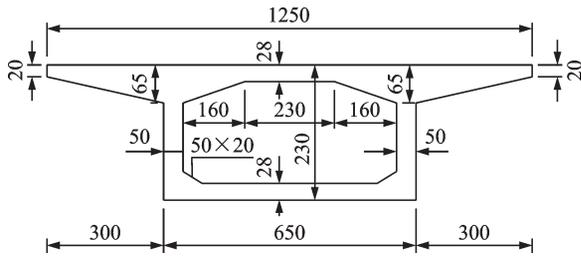


图3 主梁标准截面(单位:cm)

Fig. 3 Standard section of main beam (Unit:cm)

采用SAP2000非线性有限元程序进行计算,其中,主梁和桥墩采用线性梁单元模拟;固定支座通过2号桥墩墩顶节点与主梁相应节点body主从束缚模拟,滑动支座采用Wen塑性单元模拟,质量转动缠绕索装置采用多段线塑性连接单元模拟;不考虑基础的桩-土相互作用,桥墩与地面按刚性连接处理。图4为该桥计算模型。

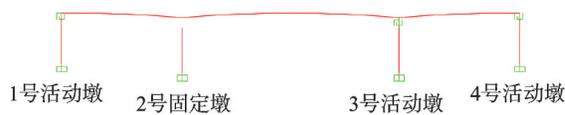


图4 计算模型

Fig. 4 Calculation model

3 减震效果分析

首先,为研究规则桥梁质量转动缠绕索装置的减震效果,计算考虑两种工况:工况①为未采用质量转动缠绕索装置的原桥设计模型,即2号桥墩采用固定支座,1,3和4号桥墩支座采用纵向滑动支座;

工况②为设置质量转动缠绕索装置模型,即2号桥墩采用固定支座,1,3和4号桥墩支座采用纵向滑动支座和质量转动缠绕索装置。设定质量转动缠绕索装置的初始设计参数为附加质量20000 kg、质量放大系数25、加速度阈值 1 m/s^2 、缠绕圈数10圈、摩擦系数0.05、初始间隙0.04 m。输入表1所示的地震波进行非线性时程分析,输入方向仅考虑顺桥向水平方向。

表1 分析用地震波

Tab. 1 Seismic waves for analysis

地震波名称	加速度峰值/gal	持时/s
El-Centro波	341.7	53.73
Taft波	175.83	54.38
天津波	145.8	19.19

表2给出了在3种地震波输入下,两种工况中结构2号固定墩和3号活动墩墩底剪力与弯矩的结果比较。由表2可以看出,未采用质量转动缠绕索装置的原桥设计模型,在3种地震波输入下,固定墩的受力均远远大于活动墩的受力。固定墩与活动墩墩底弯矩的比值在Taft波作用下为6.6,在天津波作用下为20.9;剪力比值在Taft波作用下为7.6,在天津波作用下为23。采用质量转动缠绕索装置后,固定墩的地震响应明显降低,弯矩最大降低40.8%,剪力最大降低37.8%;活动墩的地震响应大幅增加,弯矩最大增幅为6.5倍,剪力最大增幅为5.4倍。固定墩与活动墩墩底的内力响应比值也降低至2左右。装置对于结构的减震效果与协同受力效果起到了明显作用。

表2 两种工况下地震响应对比

Tab. 2 Comparison of seismic response under two working conditions

工况	位置	El-Centro波		Taft波		天津波	
		剪力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
①	2号固定墩	6.66×10^4	5.89×10^5	5.04×10^4	4.54×10^5	1.30×10^5	1.24×10^6
	3号活动墩	6.59×10^3	6.50×10^4	6.61×10^3	6.85×10^4	5.68×10^3	5.94×10^4
	固定墩/活动墩	10.1	9.1	7.6	6.6	23.0	20.9
②	2号固定墩	6.01×10^4	4.94×10^5	4.71×10^4	3.99×10^5	8.12×10^4	7.34×10^5
	3号活动墩	2.04×10^4	2.50×10^5	2.04×10^4	2.46×10^5	3.06×10^4	3.84×10^5
	固定墩/活动墩	2.9	2.0	2.3	1.6	2.7	1.9
$[(2)-①]/① \times 100\%$	2号固定墩	-9.8%	-16.2%	-6.5%	-12.1%	-37.8%	-40.8%
②/①	3号活动墩	3.1	3.8	3.1	3.6	5.4	6.5

图5为两种工况下,3条地震波作用下主梁梁端位移(2号固定墩墩顶位移)时程的对比曲线。可以看出,采用质量转动缠绕索装置后对结构梁端位移的控制会产生一定的效果,不同地震输入特性的地

震波的控制效果有所不同,其中El-Centro波作用下,结构梁端位移减小约17%;Taft波作用下,结构梁端位移增加约0.9%;天津波作用下,结构梁端位移减小约41%。

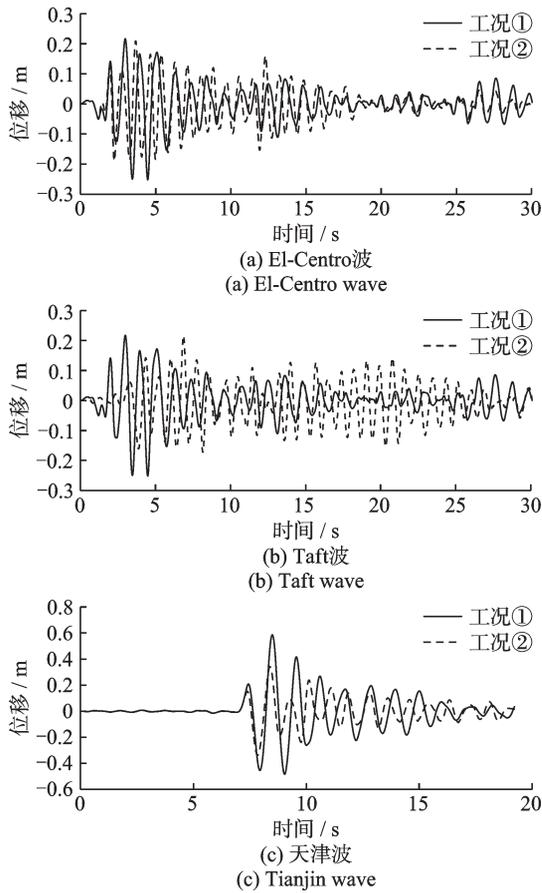


图 5 两种工况下主梁梁端位移时程曲线

Fig. 5 Main beam displacement time history under two working conditions

4 影响参数分析

由质量转动缠绕索装置的恢复力模型可以看出,装置是由转动轴两端附加质量块的转动惯性力作为缠绕索主动端的拉力,通过缠绕索的放大作用实现稳定的摩擦力,继而提供一个较大的被动端拉力。根据缠绕索机理和装置恢复力模型可以看出,附加质量、摩擦系数以及缠绕索缠绕圈数会对装置被动端拉力产生影响,且装置被动端拉力会随摩擦系数和缠绕索缠绕圈数的变化而发生指数性变化。另外,为使装置满足结构在正常运营状态下温度荷载等引起的缓慢变位的需求,需要给缠绕绳索一定初始松弛量。初始松弛量的设置需要综合考虑结构在正常状态下由温度、收缩、徐变、车辆制动力等荷载引起的变位需求,结合结构的地震响应规律所确定。因此,为了研究装置设计参数对结构地震响应及减震效果的影响,本文选取附加质量、摩擦系数以及缠绕索初始间隙三个参数进行分析。参数取值如表 3 所示。

表 3 模型计算参数

Tab. 3 Calculation parameters

附加质量/kg	摩擦系数	初始松弛间隙/m
1440	0.01	0.02
13800	0.02	0.04
27600	0.03	0.06
41400	0.04	0.08
55200	0.05	0.1
69000	—	—

4.1 附加质量

附加质量按照表 3 所示参数取值,其他参数为:质量放大系数 17、加速度阈值 1 m/s^2 、缠绕圈数 10 圈、摩擦系数 0.05、初始松弛间隙 0.04 m。输入表 1 所示的地震波进行非线性时程分析,比较 2 号固定墩和 3 号活动墩墩底弯矩响应以及梁端位移响应。

由图 6 所示的 2 号固定墩墩底弯矩随附加质量的变化可知:采用质量转动缠绕索装置后,随着附加质量的增加,质量转动缠绕索装置所提供的摩擦阻力越来越大,固定墩墩底弯矩地震响应随着附加质量的增加总体呈现出减小的趋势。在不同频谱特性的地震波输入下,结构地震响应随着附加质量的增加呈现出不同的变化趋势。其中,在 II 类场地 El-Centro 波和 III 类场地 Taft 波作用下,固定墩墩底弯矩地震响应受附加质量影响并不明显。在 IV 类场地天津波作用下,固定墩墩底弯矩响应受附加质量的影响较为明显,在附加质量为 55200 kg 时有一个明显的减小趋势,后呈现一个较大的增长趋势。但在不同频谱特性的地震波作用下,固定墩墩底弯矩响应均小于未采用质量转动缠绕索装置时的地震响应。结果表明,采用质量转动缠绕索装置的连续梁桥可以有效地降低固定墩的地震响应,但需要根据场地条件对附加质量的取值范围进行分析,以确保结构地震响应得到很好的控制。

由图 7 可知,随着附加质量的增加,活动墩墩底弯矩均呈现逐步增加的趋势。说明随着附加质量的

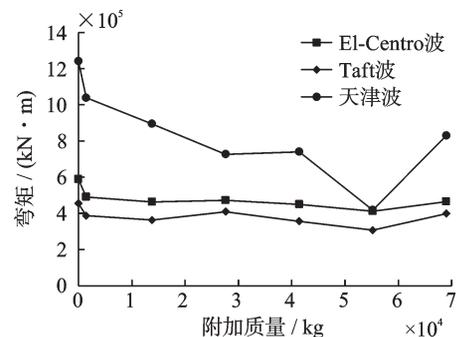


图 6 2 号固定墩墩底弯矩

Fig. 6 Moment of 2# fixed pier bottom

增加,所需激起装置的惯性力增大,在其他设计参数保持不变的前提下,进而通过摩擦轴引起的附加摩擦力也增大,活动墩以此摩擦力提供的刚度参与结构纵向受力也就更多。质量转动缠绕索装置可以很好地协同活动墩与固定墩之间的受力。

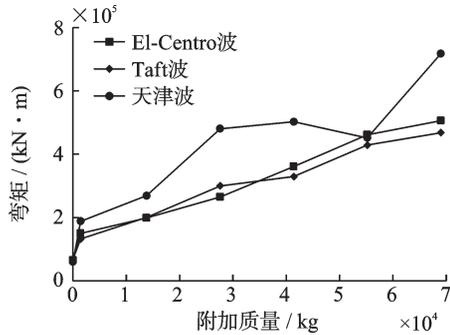


图7 3号活动墩墩底弯矩

Fig. 7 Moment of 3rd sliding pier bottom

图8给出了梁端位移随附加质量的变化趋势,总体而言与墩底弯矩的变化类似,即对于不同的地震波输入,采用质量转动缠绕索装置后,结构的梁端位移响应值均小于未采用装置时的响应值。不同输入地震波特性的影响规律不同,在天津波作用下位移响应的变化趋势与El-Centro波和Taft波作用下不一致,随着附加质量的增加呈现先降后升的变化趋势。

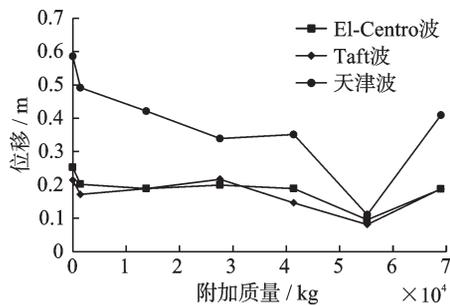


图8 主梁梁端位移

Fig. 8 Displacement of main beam end

4.2 摩擦系数

摩擦系数按照表3所示参数取值,其他参数为:附加质量20000 kg、质量放大系数17、加速度阈值 1 m/s^2 、缠绕圈数10圈、初始松弛间隙0.04 m。输入表1所示的地震波进行非线性时程分析,比较2号固定墩和3号活动墩墩底弯矩响应以及梁端位移响应。

由图9所示的2号固定墩墩底弯矩随摩擦系数的变化可知:随着摩擦系数的增加,绳索与摩擦轴之间的摩擦耗能逐步增加,结构地震响应随着摩擦系数的增加总体呈现出下降的趋势。在不同频谱特性

的地震波输入作用下,结构地震响应的总体变化趋势基本相似,但在II类场地El-Centro波和III类场地Taft波作用下,结构的地震响应随摩擦系数的变化并不十分明显,减震率均在15%左右;反而在IV类场地天津波作用下,结构的地震响应随摩擦系数的增加而降低的趋势较为明显,摩擦系数为0.05时的结构响应与未采用质量转动缠绕索装置的响应相比,结构地震响应减震率在35%左右。不同频谱特性的地震波输入作用下,结构地震响应随摩擦系数的增加均体现出一定的减震效果。

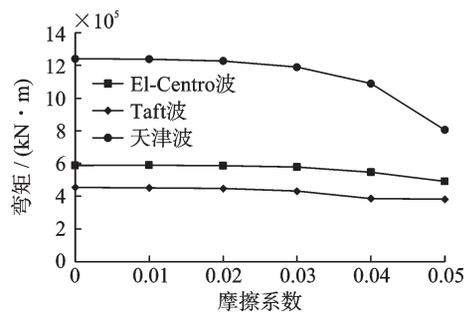


图9 2号固定墩墩底弯矩

Fig. 9 Moment of 2nd fixed pier bottom

由图10所示3号活动墩墩底弯矩随摩擦系数的变化可知:随着摩擦系数的增加,活动墩墩底弯矩均呈现逐步增加的趋势,且在3种地震波输入下的变化趋势基本相似。在摩擦系数取值为0.01~0.03时,曲线变化的幅度不大;当摩擦系数取值大于0.03时,曲线的变化幅度较大,说明摩擦系数对于活动墩的弯矩地震响应影响较大。

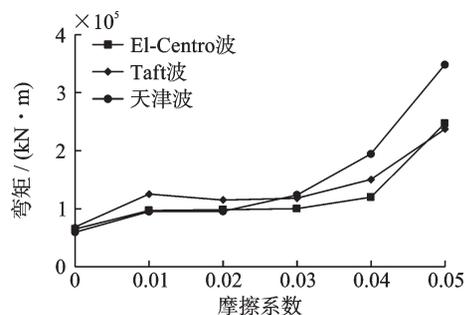


图10 3号活动墩墩底弯矩

Fig. 10 Moment of 3rd sliding pier bottom

图11给出了梁端位移随摩擦系数的变化趋势,总体而言与墩底弯矩的变化类似,即对于不同的地震波输入,采用质量转动缠绕索装置后,结构的梁端位移响应值均小于未采用装置时的响应值。不同特性的地震波的影响规律不同,在El-Centro波和Taft波作用下,位移响应随着摩擦系数的增加呈现出逐步降低的趋势,曲线总体变化趋势较为平缓;而在天津波作用下,梁端位移响应随着摩擦系数增加的变化

化幅度较大,体现出了不同频谱特性地震波作用效应的不同。

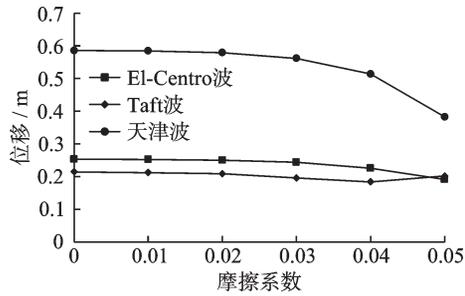


图 11 主梁梁端位移

Fig. 11 Displacement of main beam end

4.3 初始松弛间隙

初始松弛间隙按照表 3 所示参数取值,其他参数为:附加质量 20000 kg、质量放大系数 17、加速度阈值 1 m/s^2 、缠绕圈数 10 圈、摩擦系数 0.05。输入表 1 所示的地震波进行非线性时程分析,比较 2 号固定墩和 3 号活动墩墩底弯矩响应以及梁端位移响应。

由图 12 所示的 2 号固定墩墩底弯矩随初始松弛间隙的变化可知:采用质量转动缠绕索装置后,随着初始松弛间隙的增加,在 3 种地震波输入下的 2 号固定墩墩底弯矩均呈现先升后降的变化趋势,即在质量转动缠绕索装置不设置初始间隙时,固定墩的地震响应最小,后随着初始间隙的增加,固定墩的地震响应逐渐增加,但弯矩总体随初始松弛间隙的变化并不明显,总体增幅在 10% 左右。说明初始间隙对于固定墩受力的影响并不十分明显。

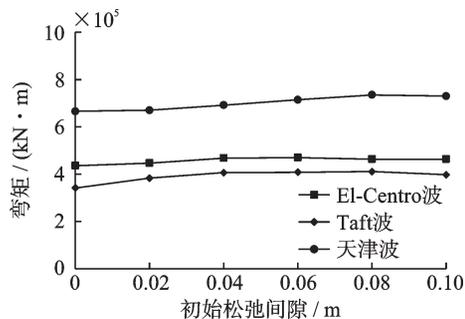


图 12 2号固定墩墩底弯矩

Fig. 12 Moment of 2[#] fixed pier bottom

由图 13 所示 3 号活动墩墩底弯矩随初始松弛间隙的变化可知:随着初始松弛间隙的增加,活动墩墩底弯矩均呈现逐步增加的趋势,且在 3 种地震波输入下的变化趋势基本相似。当初始松弛间隙取值大于 0.02 时,曲线的变化幅度较为平缓,说明较大的初始松弛间隙对于活动墩的弯矩地震响应影响不太明显。

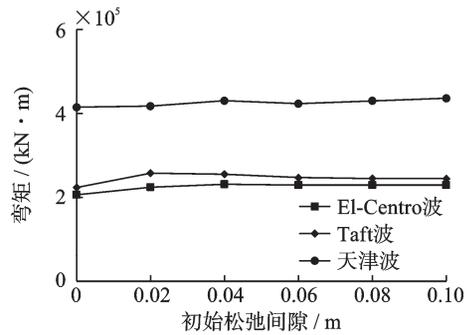


图 13 3号活动墩墩底弯矩

Fig. 13 Moment of 3[#] sliding pier bottom

图 14 给出了梁端位移随初始松弛间隙的变化趋势。梁端位移随初始松弛间隙的变化趋势与墩底弯矩的变化趋势类似。

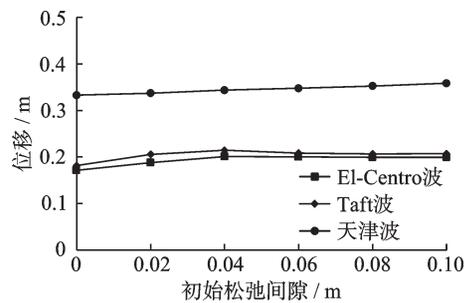


图 14 主梁梁端位移

Fig. 14 Displacement of main beam end

5 结 论

本文提出一种通过转动轴两端的附加质量块的转动惯性力作为缠绕索主动端拉力,从而提供给结构稳定的摩擦力,由此达到锁定及摩擦耗能作用的质量转动缠绕索装置。该装置既可以满足结构在正常运营状态下温度荷载等引起的缓慢变位需求,又可以达到在地震作用下各桥墩协同受力和限制位移的目的。基于一座三跨典型连续梁桥的数值模拟,探究了装置的协同受力与减震效果,得到以下结论:

(1) 质量转动缠绕索装置对于改善固定墩受力,发挥活动墩抗震潜能,提升桥梁减震效果与协同受力效果起到了明显作用。

(2) 附加质量对固定墩地震响应和活动墩分担上部结构纵向地震水平荷载的大小影响较为明显,不同频谱特性的地震波输入下,附加质量对结构的地震响应的影响效果不同,需要进一步研究地震动频谱特性对质量转动缠绕索装置的地震响应的影响规律。

(3) 结构地震响应随着摩擦系数的增加总体呈现降低的趋势,从固定墩墩底地震响应减震的角度来看,摩擦系数宜取较大值,但需要注意活动墩的受

力情况,避免造成活动墩的损伤。设计时,需结合连续梁桥总体地震性能和地震输入确定最优的摩擦系数的取值。

(4)对于等墩高规则连续梁而言,在考虑常规荷载作用下结构变位需求的基础上,质量转动缠绕索装置的初始间隙对于结构减震效果以及活动墩的协同受力效果的影响并不十分明显,因此,初始间隙取值范围可以比较宽泛。

参考文献:

- [1] 范立础,李建中. 汶川桥梁震害分析与抗震设计对策[J]. 公路,2009(5): 122-128.
- [2] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报,2009, 28(7): 1377-1387.
ZHUANG Weilin, LIU Zhenyu, JIANG Jinsong. Earthquake-induced damage analysis of highway bridges in Wenchuan earthquake and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1377-1387.
- [3] 刘健新,赵国辉. “5·12”汶川地震典型桥梁震害分析[J]. 建筑科学与工程学报,2009, 26(2): 92-97.
LIU Jianxin, ZHAO Guohui. Typical bridge damage analysis in “5·12” Wenchuan earthquake[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 92-97.
- [4] 王东升,郭迅,孙治国,等. 汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J]. 地震工程与工程振动,2009, 29(3): 84-94.
WANG Dongsheng, GUO Xun, SUN Zhiguo, et al. Damage to highway bridges during Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 84-94.
- [5] 李鸿晶,陆鸣,温增平,等. 汶川地震桥梁震害的特征[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2009, 31(1): 24-29.
LI Hongjing, LU Ming, WEN Zengping, et al. Characteristics of bridge damages in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 31(1): 24-29.
- [6] 蒋劲松,庄卫林,刘振宇. 汶川地震百花大桥震害调查分析[J]. 桥梁建设,2008(6): 41-44.
JIANG Jinsong, ZHUANG Weilin, LIU Zhenyu. Investigation and analysis of seismic damage to Baihua bridge in Wenchuan earthquake[J]. Bridge Construction, 2008(6): 41-44.
- [7] 王克海,孙永红,韦韩,等. 汶川地震后对我国结构工程抗震的几点思考[J]. 公路交通科技,2008, 25(11): 54-59.
WANG Kehai, SUN Yonghong, WEI Han, et al. Comments on seismic strengthening for structural engineering in China after Wenchuan earthquake[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(11): 54-59.
- [8] 周国良,崔成臣,刘必灯,等. 汶川8.0级地震中几座近断层桥梁失效模式的初步探讨[J]. 震灾防御技术,2008, 3(4): 370-378.
ZHOU Guoliang, CUI Chengchen, LIU Bideng, et al. Failure modes of near-fault bridges in Wenchuan earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(4): 370-378.
- [9] 尹海军,徐雷,申跃奎,等. 汶川地震中桥梁损伤机理探讨[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008, 40(5): 672-677.
YIN Haijun, XU Lei, SHEN Yuekui, et al. Study on the seismic damages to the bridges in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(5): 672-677.
- [10] 管仲国,黄勇,张昊宇,等. 青海玛多7.4级地震桥梁工程震害特性分析[J]. 世界地震工程,2021, 37(3): 38-45.
GUAN Zhongguo, HUANG Yong, ZHANG Haoyu, et al. Damage characteristics and analysis of bridge engineering in M7.4 Qinghai Maduo earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(3): 38-45.
- [11] New Zealand Standard Code of Practice for the Design of Concrete Structures[S]. NZS3101,1995
- [12] Standard specifications for highway bridges[S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Inc., 2002.
- [13] Seismic design criteria[S]. Sacramento, California: California Department of Transportation (CALTRANS), Division of Structures, 2004.
- [14] Design provisions for earthquake resistance of structures [S]. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 1998.
- [15] 道路桥示方书·同解说: V 耐震设计篇[S]. 东京:日本道路协会,2002.
- [16] AASHTO guide specification for LRFD seismic bridge design[S]. Subcommittee for Seismic Effects on Bridges T-3, 2007.
- [17] EIDINGER J M, KELLY J M. Experimental results of an earthquake isolation system using natural rubber bearings:UCB/EERC-78/03[R]. 1978.
- [18] TYLER R G, ROBINSON W H. High-strain tests on lead-rubber bearings for earthquake loadings[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1984, 17(2): 90-105.
- [19] ABE M, YOSHIDA J, FUJINO Y. Mufti-axial behav-

- iors of laminated rubber bearings and their modeling. I : experimental study[J]. Journal of Structure Engineering, 2004, 130(8): 1119-1132.
- [20] 彭天波,李建中,范立础. 双曲面球型减隔震支座的竖向位移分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(9):1181-1185.
- PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Analysis of vertical displacement of double spherical aseismic bearing[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(9): 1181-1185.
- [21] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd. Specifications for seismic design of highway bridges: JTG/T 2231-01—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [22] 柳甘旺. “索网三通紧”的力学原理[J]. 物理教学, 1985(6): 34-36.

Isolation effect and influence parameters of mass rotating wrap rope device for regular continuous girder bridge

LIU Yan-fang^{1,2}, ZHANG Wen-xue¹, DU Xiu-li¹, BAO Wei-gang²

(1.College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2.China Communications Construction Company Limited, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to solve the problem of seismic design of continuous beam bridge in which the longitudinal seismic inertia force is only carried by the fixed pier, the seismic potential of the movable pier is fully exerted with the same section as the fixed pier. Based on the principle of wrap rope, the mass rotation wrap rope device excited by additional mass inertia force is developed to realize the cooperative force of fixed pier and movable pier and limit the relative displacement of beam end. Based on the working principle and structural characteristics of the device, the restoring force model of the device is proposed, and through a 3-span regular continuous beam bridge, the finite element model of the whole bridge is established. The effects of additional mass, friction coefficient and initial relaxation coefficient on the vibration reduction performance of continuous beam bridge are systematically analyzed. The results show that the effect of mass rotation wrap rope device on reducing the seismic response of fixed pier and lifting the movable pier to participate in the longitudinal whole cooperative force of continuous beam bridge is obvious. The influence of parameters of different seismic wave input characteristics is slightly different, but reasonable design parameters of the device will produce a more obvious effect of shock absorption.

Key words: continuous girder bridge; mass rotation wrap rope device; damping effect; additional mass; friction coefficient; initial relaxation coefficient

作者简介: 刘延芳(1982—),男,博士研究生,教授级高级工程师。E-mail:sky722@163.com。