

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.016



脉冲地震作用下千米级斜拉桥减震设计方法

韩振峰¹, 叶爱君²

(1. 合肥学院 建筑工程系, 合肥 230601; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:为研究近断层脉冲地震作用下千米级斜拉桥的减震设计方法,以某漂浮型千米级斜拉桥为背景,建立了有限元模型,选择了典型的近断层脉冲型地震动,同时设计了3种减震体系,在塔梁之间分别采用弹性连接装置、流体粘滞阻尼器以及两者的组合装置。随后对模型进行了非线性动力分析,分析了脉冲效应、减震体系的设计参数和减震效果,结果表明:脉冲长周期放大结构反应,剪切波速不影响结构反应,组合装置的减震效果最好。最后,建议了基于目标减震率的减震体系设计流程。

关键词:斜拉桥;减震体系;非线性动力分析;脉冲周期;阻尼器

中图分类号:U449 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0111-10

Research on seismic-reduction for cable-stayed bridges over kilometers under pulse earthquake action

Han Zhenfeng¹, Ye Aijun²

(1. Department of Architectural Engineering, Hefei University, Hefei 230601, P. R. China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: To study the seismic design method for kilometer-scale cable-stayed bridge under near-fault impulse ground motion, a finite element model was established. The typical near-fault impulse ground motion was selected, and three damping systems were designed. The elastic connection device, the fluid viscous damper and the combination device of the two were used between the towers and beams respectively. Nonlinear dynamic analysis of the model was then carried out, based on which the impulse effect, the design parameters of the damping system and the damping effect were analyzed. The results show that the impulse long-period amplifies the structural response while the shear wave velocity has no effect on the structural response. In addition, the damping effect of the combination device is the best. Finally, the design flow chart for the damping system based on the target damping rate was proposed.

Keywords: cable-stayed bridge; seismic-reduction system; nonlinear dynamic analysis; pulse period; damper

大型跨江(海)桥梁工程中,很多采用大跨度斜拉桥的结构形式,并且跨度超越千米的会越来越多。这

些桥梁可能位于近断层地带,会受到脉冲地震动的影响,所以,抗震安全性是必须要解决的一个重要课题。

收稿日期:2017-08-15

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2015A249);合肥学院人才科研基金(15RC01)

作者简介:韩振峰(1976-),男,博士,主要从事桥梁抗震研究,E-mail:hazhenfeng2010@126.com.

叶爱君(通信作者),女,教授,博士,E-mail:Yeaijun@126.com.

Received:2017-08-15

Foundation item: Key Projects of Science Research in Colleges and Universities of Anhui Province(No. KJ2015A249); Hefei College Scientific Research Fund Project(No. 15RC01)

Author brief: Han Zhenfeng (1976-), associate professor, PhD, main research interest: bridge seismic reduction, E-mail: hazhenfeng2010@126.com.

Ye Aijun(corresponding author), professor, PhD, E-mail:Yeaijun@126.com.

文献[1-4]对跨径在 500 m 内的斜拉桥减震控制进行了研究,针对相应的结构采取了一些减震装置,进行了减震分析。文献[5]对一座千米级斜拉桥的减震机理和方法进行了系统研究,并且给出了该类桥梁纵向合理的减震体系,但是,上述研究都不是以近断层脉冲地震动作用为研究对象。文献[6-7]针对近断层地震下斜拉桥的减震进行了研究,但是,研究对象是中等跨度斜拉桥。针对近断层脉冲地震动作用下千米级斜拉桥的减震研究,还比较少。要解决这个问题,首先要搞清楚超千米级斜拉桥在脉冲地震动下地震反应特性。文献[8]针对远场地震动研究超千米级斜拉桥的地震反应特性,包括线性和几何非线性动力反应等。文献[9]针对近场地震动来研究超千米级斜拉桥的地震反应特性,但是没有考虑塔梁的几何非线性。文献[10-13]针对近场地震动研究中小跨径斜拉桥的地震反应特性,主要研究弹性动力反应以及竖向地震反应等。这些研究成果,都不能对脉冲地震作用下超千米级斜拉桥的减震提供帮助,需要进行新的研究。

为此,挑选了典型的近断层脉冲型地震动,并生成了相应的非脉冲型人工地震动;以某漂浮型千米

级斜拉桥为背景,建立了有限元模型,给出了动力分析方法,并得到了考虑恒载几何刚度的动力特性;进行了脉冲影响分析,得出脉冲长周期放大结构反应,而剪切波速不影响结构反应;设计了 3 种减震体系,在塔梁之间分别采用弹性连接装置、流体粘滞阻尼器以及两者的组合装置,同时,进行了非线性动力反应分析,研究了减震体系的设计参数;对减震效果进行了比较和讨论;最后,建议了基于目标减震率的减震体系设计流程。

1 近断层地震动的处理

1.1 典型近场脉冲型地震波的选择

典型近场脉冲型地震波的选择原则:1)震源距断层最近距离小于 10 km;2)地面下 30 m 内剪切波速 V_{s30} (m/s)的平均值在(250,300)和(450,500)两个区间内;3)PGV/PGA 大于 0.2;4)脉冲周期变化显著。根据上述原则,在 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)的 NGA(Next Generation Attenuation)地震动数据库中,选择了 2 组地震波,第 1 组 V_{s30} 在(250,300)之间,第 2 组 V_{s30} 在(450,500)之间,每组 4 条,共 8 条地震波,具体参数见表 1 和表 2。

表 1 近场脉冲型地震波参数

Table 1 Near-field pulse type seismic wave parameters

| 组号 | 序号 | 地震名 | 观测站点 | 震级 | 震中距/ km | 震源距断层 最近距离/km | 脉冲 周期 | 剪切波速 $V_{s30}/(m \cdot s^{-1})$ |
|----|----|---------------|---------------------------|------|------------|------------------|----------|------------------------------------|
| 1 | 1 | Northridge-01 | Newhall Fire Sta | 6.69 | 26.78 | 5.92 | 1.036 | 269.1 |
| | 2 | Northridge-01 | Newhall W Pico Canyon Rd. | 6.69 | 27.76 | 5.48 | 2.408 | 285.9 |
| | 3 | Northridge-01 | Rinaldi Receiving Sta | 6.69 | 20.62 | 6.50 | 1.232 | 282.3 |
| | 4 | Chi-Chi | TCU101 | 7.62 | 45.75 | 2.13 | 11.538 | 272.6 |
| 2 | 5 | Chi-Chi | TCU049 | 7.62 | 39.73 | 3.78 | 11.655 | 487.3 |
| | 6 | Chi-Chi | TCU053 | 7.62 | 41.97 | 5.97 | 12.845 | 454.6 |
| | 7 | Chi-Chi | TCU068 | 7.62 | 48.52 | 0.32 | 12.166 | 487.3 |
| | 8 | Loma Prieta | LGPC | 6.93 | 25.42 | 3.88 | 4.396 | 477.7 |

表 2 近场脉冲型地震波峰值参数

Table 2 Near-field pulse type seismic wave peak value parameters

| 组号 | 序号 | 分量 | PGA/g | PGV/ ($m \cdot s^{-1}$) | PGV/ PGA | 组号 | 序号 | 分量 | PGA/g | PGV/ ($m \cdot s^{-1}$) | PGV/ PGA |
|----|----|----|-------|------------------------------|-------------|----|----|----|-------|------------------------------|-------------|
| 1 | 1 | N | 0.73 | 1.20 | 1.6 | 2 | 5 | N | 0.29 | 0.46 | 1.6 |
| | | P | 0.65 | 0.51 | 0.8 | | | P | 0.25 | 0.59 | 2.4 |
| | | V | 0.55 | | | | | V | 0.17 | | |
| | 2 | N | 0.43 | 0.88 | 2.0 | | 6 | N | 0.23 | 0.41 | 1.8 |
| | | P | 0.28 | 0.75 | 2.7 | | | P | 0.14 | 0.41 | 2.9 |
| | | V | 0.29 | | | | | V | 0.12 | | |
| | 3 | N | 0.87 | 1.67 | 1.9 | | 7 | N | 0.57 | 1.85 | 3.2 |
| | | P | 0.42 | 0.63 | 1.5 | | | P | 0.43 | 2.51 | 5.8 |
| | | V | 0.83 | | | | | V | 0.49 | | |
| | 4 | N | 0.21 | 0.69 | 3.3 | | 8 | N | 0.95 | 0.97 | 1.0 |
| | | P | 0.24 | 0.52 | 2.2 | | | P | 0.54 | 0.72 | 1.3 |
| | | V | 0.17 | | | | | V | 0.89 | | |

注:N表示垂直断层水平方向;P表示平行断层水平方向;V表示垂直方向(主要研究N+V方向的组合效应)。

近场脉冲型地震波的选择完成后, 对其进行验证处理, 具体步骤为: 1) 积分产生速度波; 2) 验证速度波中含有速度脉冲。对两组地震波的验证结果见图 1 和图 2(N 方向), 从图中可以看出, 所选的两组 8 条地震动时程均含有速度脉冲。

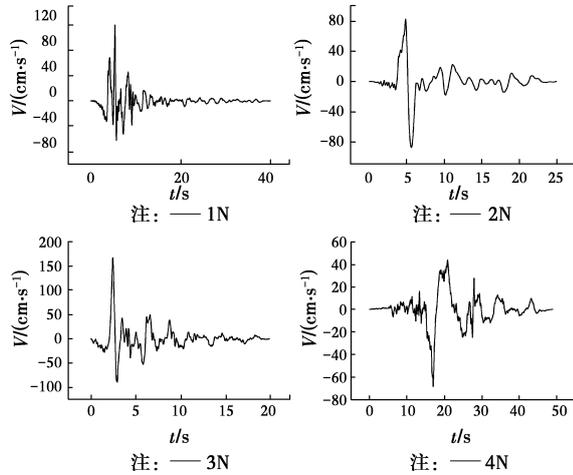


图 1 第 1 组 N 方向的速度时程

Fig. 1 Velocity time history in N direction of group 1

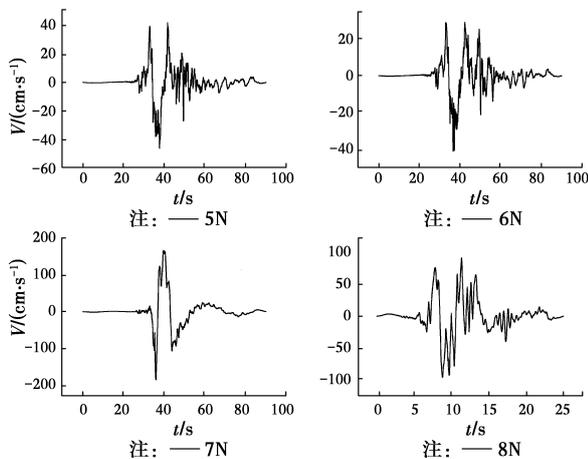


图 2 第 2 组 N 方向的速度时程

Fig. 2 Velocity time history in N direction of group 2

1.2 近场非脉冲型地震波的生成

为研究近场脉冲型地震波对桥梁结构的影响, 需要得到与其相应的近场非脉冲型地震波。对前述两组 8 条近场脉冲型地震波采用一些方法进行处理, 得到了相应的近场非脉冲型地震波。具体处理方法为^[14]: 1) 由近场脉冲型地震波 T_i 生成相应的加速度反应谱 S_i ; 2) 由加速度反应谱 S_i 模拟产生人造地震波 T_{in} (去除脉冲成分); 3) 验证人造地震波 T_{in} (频谱分析), 通过傅立叶谱值和 PGA 值等因素进行验证; 4) 由人造地震波 T_{in} 积分产生速度波 V_{in} ; 5) 验证速度波 V_{in} 中不含有速度脉冲。

地震波 T_{in} 即为生成的近场非脉冲型人工地震

波。作为示例, 对第 1 组的 1 号波和第 2 组的 5 号波(N 方向)采用该方法进行处理, 生成了地震波 T_{1n} 和 T_{5n} 。加速度时程对比见图 3, 频谱分析对比见图 4, 速度时程对比见图 5。

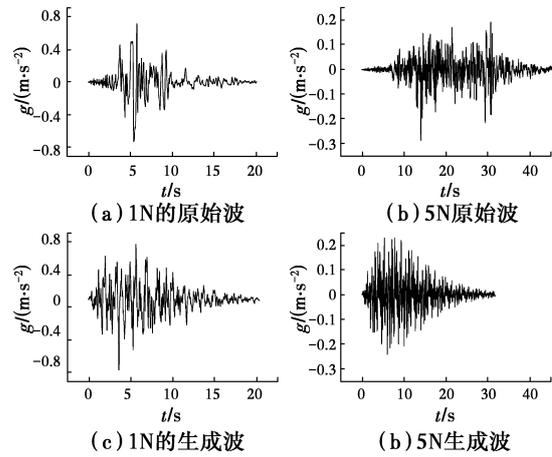


图 3 加速度时程对比

Fig. 3 Comparison of acceleration time history

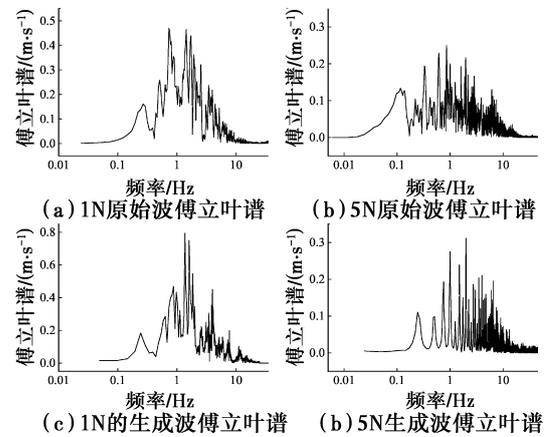


图 4 频谱分析对比

Fig. 4 Comparison of spectrum analysis

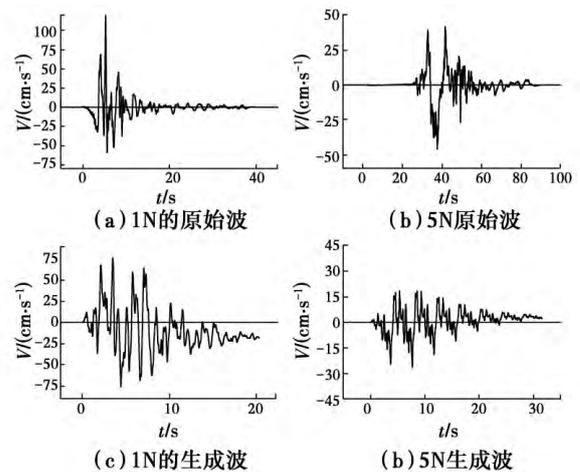


图 5 速度时程对比

Fig. 5 Comparison of velocity time history

由图 3~图 5 可以看出,生成的近场地震波的傅立叶谱和 PGA 与原始地震波基本吻合,同时,生成的近场地震波均不含有速度脉冲,该方法得到的人工波符合预期要求。

用该方法对两组 8 条(每条各取 N、V 两个方向)地震波分别进行处理,生成相应的近场地震波,为下一步的研究提供了地震动资料。同时,为了得到一致的对比结果,将各条地震波的 PGA 峰值统一调整为 $1.2g$,使得动力几何非线性效应更显著。

2 有限元模型

2.1 模型描述

某全长为 2 088 m 的七跨主梁连续双塔斜拉桥,中跨为 1 088 m,边跨为 $300\text{ m}+2\times 100\text{ m}$,采用倒 Y 形混凝土塔,桥面为钢箱梁,下横梁与主梁之间无支座装置,塔基采用高桩承台群桩基础,边墩顶纵向均设置滑动支座。

有限元分析模型^[15]中,主梁、塔和边墩用梁单元模拟,计入恒载几何刚度(由恒载轴力引起的);主梁和斜拉索之间采用主从连接;斜拉索采用桁架单元,该单元计入拉索的垂度效应和恒载几何刚度;主梁与塔和边墩纵向均无约束,横向均为主从约束;墩底(承台顶)为固结边界条件;模型如图 6 所示。

模型采用瑞利阻尼假设^[16],采用线性弹簧单元模拟弹性连接装置,采用非线性弹簧单元模拟粘滞阻尼器(Maxwell 模型),其中,弹簧刚度取 $1.0\times 10^{10}\text{ kN/m}$,阻尼参数根据分析设置。



图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

2.2 分析方法

待求解问题可描述为:一个具有 n 个自由度的斜拉桥结构,附加的流体粘滞阻尼器设置在 m 个不同位置上,受到近场地震动的作用,求该结构的地震反应,需要考虑动力几何非线性。

动力分析时的初始状态采用的是斜拉桥的成桥状态,将恒载产生的轴力转化为几何刚度,分别对应

于索、主塔、墩和梁的几何刚度^[8]。在此基础上,考虑大变形和大变位,使用直接积分法进行非线性动力分析。

2.3 动力特性

成桥状态下考虑恒载几何刚度后,对结构进行模态分析,得到的动力特性结果见表 3。

表 3 动力特性值

Table 3 Dynamic property values

| 阶数 | 振型特征 | 频率/Hz |
|----|---------|-------|
| 1 | 纵向飘浮 | 0.066 |
| 2 | 中跨对称侧弯 | 0.100 |
| 3 | 一阶对称竖弯 | 0.178 |
| 4 | 一阶反对称竖弯 | 0.220 |
| 5 | 中跨反对称侧弯 | 0.282 |
| 6 | 塔对称侧弯 | 0.308 |
| 7 | 塔反对称侧弯 | 0.372 |
| 8 | 一阶对称扭转 | 0.995 |
| 9 | 一阶反对称扭转 | 1.707 |

3 脉冲影响分析

选择不同的脉冲周期和剪切波速 V_{s30} 的地震波,分别对模型进行非线性动力分析,比较关键部位的地震反应数值^[8,17]。

为方便研究,取第 1、4 和 5 号地震波的计算结果进行比较。其中,1 号波与 4 号波,两者的脉冲周期不同,但剪切波速 V_{s30} 基本相同;4 号波与 5 号波,两者的脉冲周期基本相同,但剪切波速 V_{s30} 不同。图 7~图 10 是 3 条地震波的地震反应比较图,从图中可以看出:

1 号波与 4 号波的地震位移比较,纵桥向梁端增加 1 129.7%,塔顶增加 798.1%,说明脉冲周期对位移的影响很大,周期大,位移也大。5 号波与 4 号波的地震位移比较,纵桥向梁端减小 19.6%,梁顶减小了 17.7%。说明剪切波速 V_{s30} 增大,位移略微减小,不控制设计。

1 号波与 4 号波的地震内力比较,轴力最大增加 98.2%,剪力最大增加 208.5%,弯矩最大增加 230.6%,说明脉冲周期对地震内力的影响也较大,周期大,内力也大。5 号波与 4 号波的地震内力比较,轴力最大增加 15.2%;剪力最大减小 36.2%,弯矩最大减小 33.7%。同样也说明了剪切波速 V_{s30} 增大,内力变化幅度较小,不控制设计。

对 1 号波与 4 号波进行频谱分析,结果如图 11 所示。从图中可以看出,脉冲周期较长的 4 号波,其

优势频率在 0.033 Hz 附近;脉冲周期较短的 1 号波,其优势频率在 0.718 Hz 和 1.419 Hz 两个区段附近。由动力特性分析结果可知,结构的第 1 阶纵飘频率为 0.065 6 Hz,第 8 阶对称扭转频率为 0.994 8 Hz。脉冲长周期放大了结构的低阶反应,脉冲短周期则对反应的影响较小,因为高阶振型很难激励出来。

综上所述,脉冲周期应该是脉冲型地震反应的控制参数,而剪切波速 V_{s30} 不是控制参数,这与现有文献的研究结论基本一致。脉冲长周期放大结构反应,剪切波速增大只能提高波的传播速度。

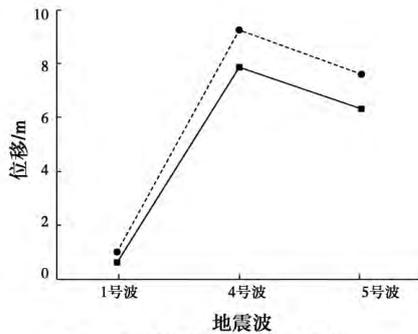


图 7 位移比较结果
Fig. 7 Displacement comparison results

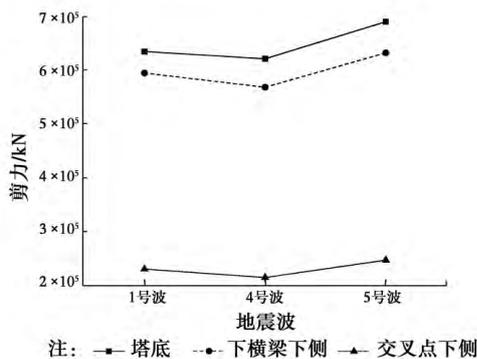


图 8 轴力比较结果
Fig. 8 Axial force comparison results

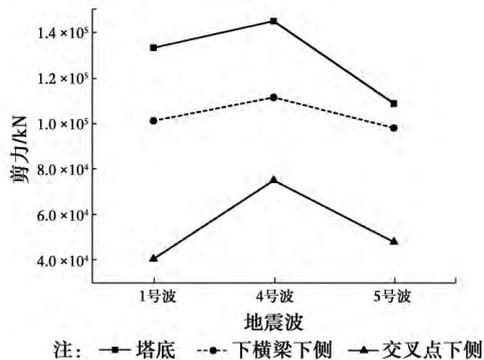


图 9 剪力比较结果
Fig. 9 Shear force comparison results

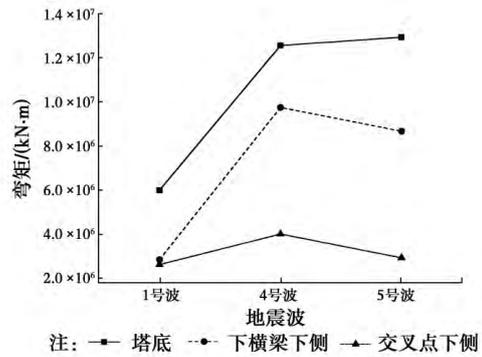


图 10 弯矩比较结果
Fig. 10 Bending moment comparison results

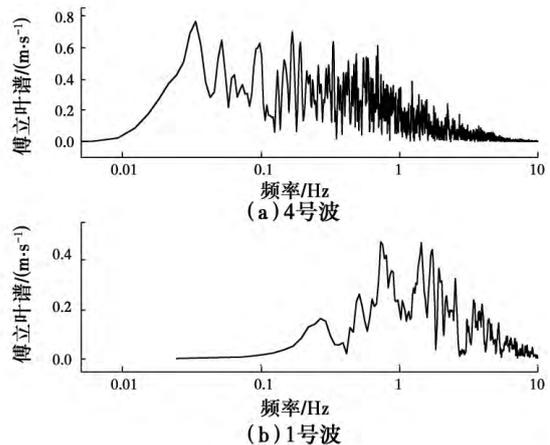


图 11 脉冲波频谱分析
Fig. 11 Spectrum analysis of pulse wave

4 减震体系分析

漂浮型斜拉桥的纵桥向减震的目的是减小位移,不增加内力。文献[18]指出,纵向漂浮型千米级斜拉桥,可采用弹性索、阻尼器和限位阻尼器等装置进行减震。

结合千米级斜拉桥的特点和现有的工程经验,设计了 3 种减震体系,在塔梁之间分别采用:弹性连接(体系 1);流体粘滞阻尼器(体系 2);弹性连接与流体粘滞阻尼器的并联组合(体系 3)。

从前述脉冲影响分析知,脉冲周期对地震位移和内力的影响都很大,周期长,位移和内力也大。因此,下面的研究,均选择长周期的地震波进行动力分析,即第 4、5、6 和 7 号地震波。

4.1 体系 1

体系 1 采用弹性连接装置,用线性弹簧模拟。弹簧刚度 K 分别取 $0, 2.5 \times 10^3, 5 \times 10^3, 7.5 \times 10^3, 1.0 \times 10^4, 1.25 \times 10^4, 1.5 \times 10^4, 2.5 \times 10^4, 5.0 \times 10^4, 7.5 \times 10^4, 1.0 \times 10^5, 1.0 \times 10^6, 1.0 \times 10^{10}$ kN/m。

每个 K 值的计算结果都取 4 条脉冲地震动所产生的平均值,同时,与人工生成的 4 条非脉冲地震加产生的平均值进行比较。

图 12~图 14 分别为梁端位移、塔底剪力和弯矩随刚度 K 的变化图。从图中可以看出:脉冲波产生的地震反应值显著大于非脉冲波产生的地震反应值。随着弹性连接装置弹性刚度的增大,脉冲波和非脉冲波梁端位移均先增大后减小,最后接近平稳;而塔底剪力和弯矩总体上增大,但有个谷值。脉冲地震波与非脉冲地震波的反应规律基本相同。

由上述可知,合适刚度 K 可减小梁端及塔梁相对位移,同时使内力增加得较小。考虑在内力反应谷值处,兼顾梁端位移反应值,体系 1 弹簧刚度参数取 $2.0 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 。

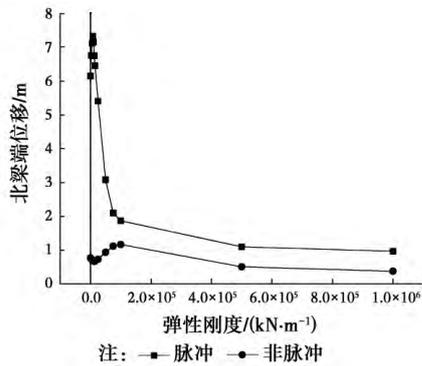


图 12 梁端位移随弹簧刚度的变化
Fig. 12 Variation of the beam end displacement with spring stiffness

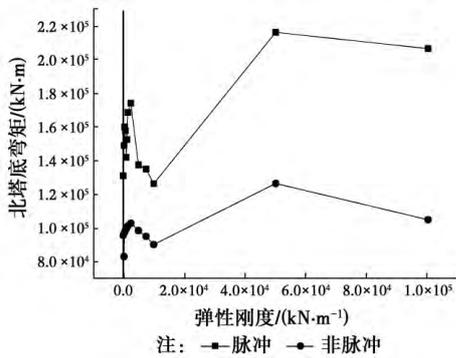


图 13 塔底剪力随弹簧刚度的变化
Fig. 13 Variation of the shear of tower bottom with spring stiffness

4.2 体系 2

体系 2 为流体粘滞阻尼器装置,使用非线性弹簧单元,减震参数是阻尼系数 C 和速度指数 α 。 α 取值分别为 0.3、0.5、0.7、1.0, C 取值分别为 0 、 1.0×10^3 、 5.0×10^3 、 1.0×10^4 、 1.5×10^4 、 2.0×10^4 、 $2.5 \times$

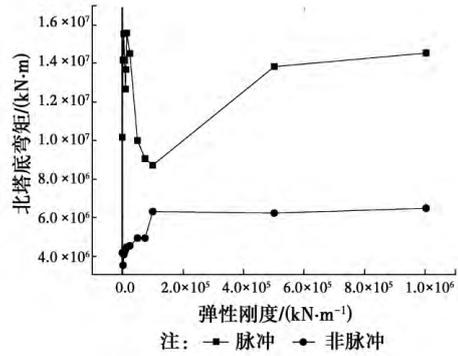


图 14 塔底弯矩随弹簧刚度的变化
Fig. 14 Variation of the moment of tower bottom with spring stiffness

10^4 共 28 组。每组计算结果都取 4 条脉冲地震动所产生的平均值,同时,与人工生成的 4 条非脉冲地震所产生的平均值进行比较。

图 15~图 17 分别为梁端位移、塔底弯矩和剪力随减震参数的变化图。从图中可以看出:对于梁端位移,随参数 C 的增加,位移反应均减小。对于塔底弯矩和剪力,随参数 C 的增加,反应有一个最小值,越过谷值后又增大。总体来看,塔底弯矩和剪力均小于飘浮体系的反应值。脉冲地震波与非脉冲地震波的反应规律基本相同,但在剪力反应规律方面有点小差别。

因为使用的地震波加速度峰值被放大了 $1.2g$,所以,导致计算出的梁端位移值和塔体内力值很大,可以采用目标减振率作为控制参数,进行阻尼参数选择。如果要求将主梁纵向位移的减振率控制在 40% 左右,体系 2 阻尼器参数 α 为 0.8, C 为 1.5×10^4 。

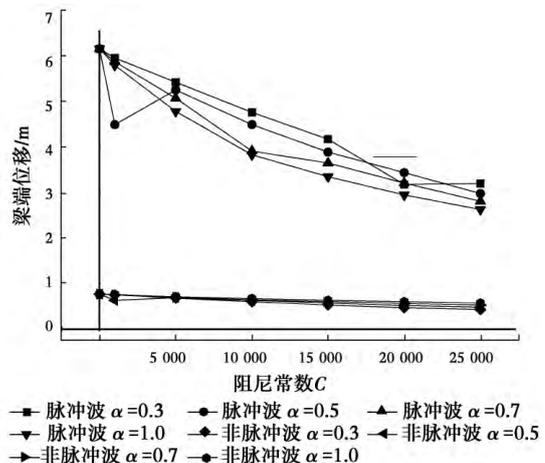


图 15 梁端位移随阻尼参数的变化
Fig. 15 Variation of the beam end displacement with damper parameters

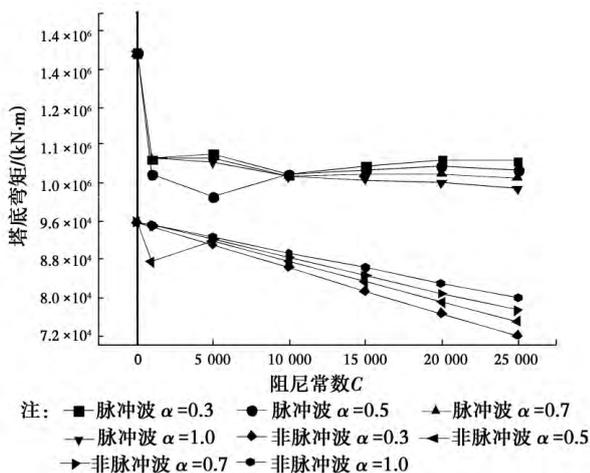


图 16 塔底剪力随阻尼参数的变化
Fig. 16 Variation of the shear of tower bottom with damper parameters

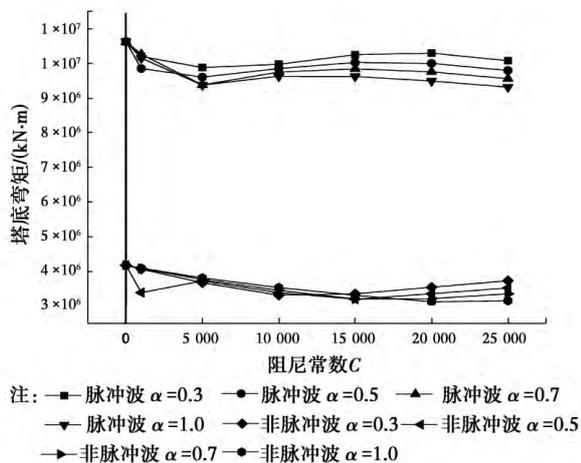


图 17 塔底弯矩随阻尼参数的变化
Fig. 17 Variation of the moment of tower bottom with damper parameters

4.3 体系 3

体系 3 采用体系 1 与体系 2 的并联组合装置,在塔梁之间同一位置设置两个连接单元,一个用线性弹簧单元,另一个用非线性弹簧单元(Maxwell 模型)。针对更大跨径的斜拉桥,两者并联组合的情况可以使用更小的代价获得更佳的减震效果,也即降低弹性连接装置刚度和粘滞阻尼器的量程,并不会减小减震效果。

体系 3 的设计是以弹性连接装置参数 K 和粘滞阻尼器参数 C 与 α 为变量的优化设计问题。因为在数值分析中发现,弹性连接装置参数的小幅变化对结构内力的影响要大于阻尼装置参数的小幅变化,也即弹性连接装置对参数的敏感性要大于阻尼装置,所以,采用先确定阻尼装置参数值,后确定弹

性连接装置参数值的优化方法。

模型中粘滞阻尼器参数取为前述参数值,即 C 为 1.5×10^4 , α 为 0.8。设定了一系列 K 值进行了地震反应分析: $K=0.5 \times 10^3, 7.5 \times 10^3, 1.0 \times 10^4, 1.5 \times 10^4, 2.5 \times 10^4, 5.0 \times 10^4, 1.0 \times 10^5, 1.0 \times 10^{10}$ kN/m 共 8 个值。每个 K 值的计算结果都取 4 条脉冲地震动所产生的平均值,同时,与人工生成的 4 条非脉冲地震加产生的平均值进行比较。

图 18~图 20 分别为在阻尼器参数一定时,梁端位移、塔底剪力和弯矩随参数 K 值的变化曲线图。从图中可以看出:随着参数 K 的增加,梁端位移先增大后减小,非脉冲地震波的反应则是单调增加。对于塔底弯矩和剪力,反应有一个谷值,越过谷值后随参数 K 的增大,反应值也在增大。值得注意的是谷值发生的位置基本相同。脉冲地震波与非脉冲地震波的内力反应规律基本相同。

综合考虑力与位移的协调,优化选用 $K=5.0 \times 10^4$ kN/m, $C=1.5 \times 10^4$, $\alpha=0.8$, 作为体系 3 的设计参数。

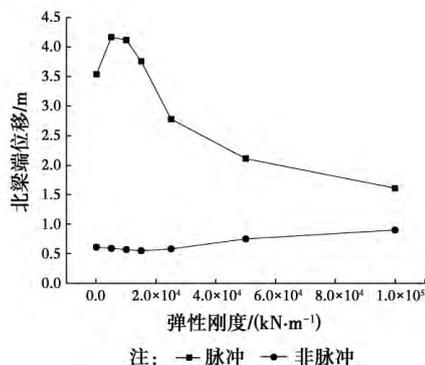


图 18 梁端位移随弹簧刚度的变化
Fig. 18 Variation of the beam end displacement with spring stiffness

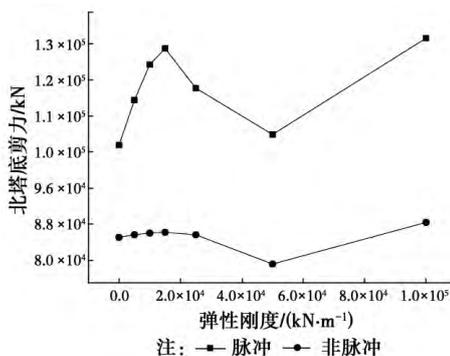


图 19 塔底剪力随弹簧刚度的变化
Fig. 19 Variation of the shear of tower bottom with spring stiffness

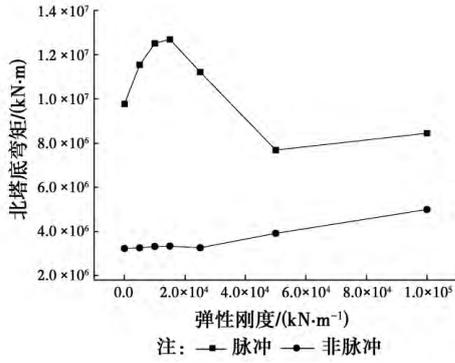
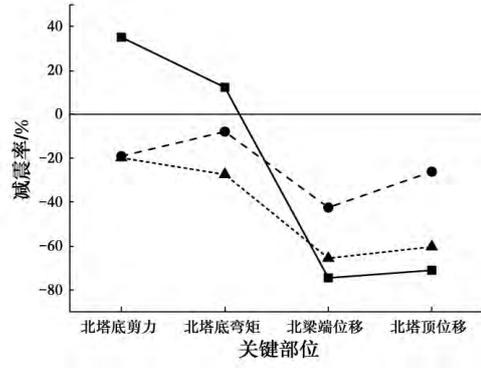


图 20 塔底弯矩随弹簧刚度的变化

Fig. 20 Variation of the moment of tower bottom with spring stiffness



注: —■— 体系1 -●- 体系2 -▲- 体系3

图 21 减震率比较

Fig. 21 Comparison of seismic-reduction rate

5 减震体系比较

由前述参数分析得到 3 种减震体系的最优减震参数。其中,体系 1 参数 $K=2.0 \times 10^5$ kN/m; 体系 2 参数 $C=1.5 \times 10^4$ 、 $\alpha=0.8$; 体系 3 组合装置参数 $C=1.5 \times 10^4$ 、 $\alpha=0.8$ 、 $K=5.0 \times 10^4$ kN/m。

分别采用前述 4 条近场脉冲型地震波作为地震动输入,以及设计的 3 种减震体系和相应的减震参数,进行动力时程分析,比较关键部位的地震反应数值,结果如表 4 所示。相对于漂浮体系的地震反应减震率如图 21 所示,图中减震率负值表示地震反应在减小,正值表示地震反应在增大。

表 4 减震反应比较

Table 4 Comparison of seismic reduction response

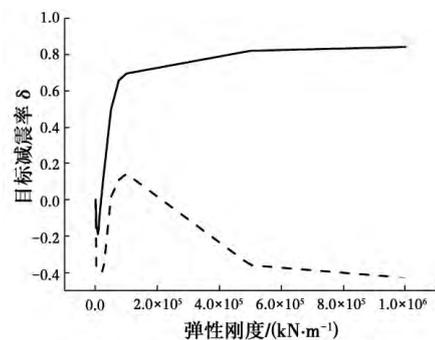
| | 塔连接装置 | | 塔底 | | 梁端 位移/ m | 塔顶 位移/ m |
|------|--------------------|----------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | 力/kN | 变形/ m | 剪力/ kN | 弯矩/ (kN·m) | | |
| 漂浮体系 | | | 1.31×10^5 | 1.06×10^7 | 6.14 | 6.16 |
| 体系 1 | 2.10×10^5 | 1.05 | 1.77×10^5 | 1.19×10^7 | 1.56 | 1.78 |
| 体系 2 | 3.27×10^4 | 3.38 | 1.06×10^5 | 9.76×10^6 | 3.53 | 4.55 |
| 体系 3 | 2.89×10^4 | 1.82 | 1.05×10^5 | 7.69×10^6 | 2.11 | 2.44 |

从图 21 和表 4 可以看出:1)对于内力减震率来说,体系 3 效果最好,塔底弯矩最大减震率达 27.5%,剪力最大减震率达 19.9%。2)对于位移减震率来说,体系 3 的效果略差与体系 1,但比体系 2 要好得多,梁端位移减震率 65.6%,塔顶位移减震率 60.4%。3)连接装置内力与变形来说,体系 3 也介于体系 1 与体系 2 之间。

综上所述,3 个体系都有一定减震作用,体系 1 弹性连接,对位移控制较好,但内力增加太多;体系 2 流体粘滞阻尼器,对位移和内力控制均一般;体系 3 弹性连接装置与流体粘滞阻尼器的组合,对位移和内力控制均较好,达到了纵桥向减震设计的目的,减小了位移,同时,也最大程度控制了结构内力。

6 减震体系的应用

根据对上述减震体系的性能分析,给出了脉冲型地震动下千米级斜拉桥的减震体系 1 和体系 2 参数设计图,如图 22 和图 23 所示。同时,根据前面的研究,建议了基于目标减震率的减震体系设计流程,如图 24 所示,可以供该类桥梁的抗震设计参考,更细致的设计流程有待工程实践的增加后,加以修正。



注: — 梁端位移 - - 塔底弯矩

图 22 体系 1 减震参数设计图

Fig. 22 Seismic-reduction parameters design diagram of systems No. 1

需要说明的是:目标减震率 δ 由实际桥梁抗震需求确定,与抗震性能有关;减震参数 C 与 α 的选择要考虑阻尼器的实际价格和体积等因素。

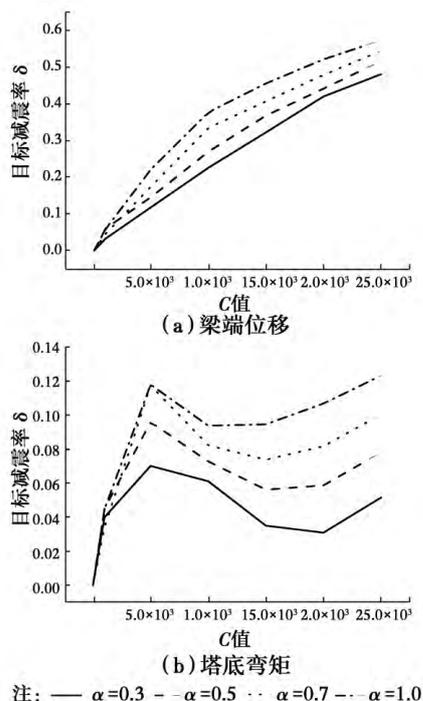


图 23 体系 2 减震参数设计图

Fig. 23 Seismic-reduction parameters design diagram of systems No. 2

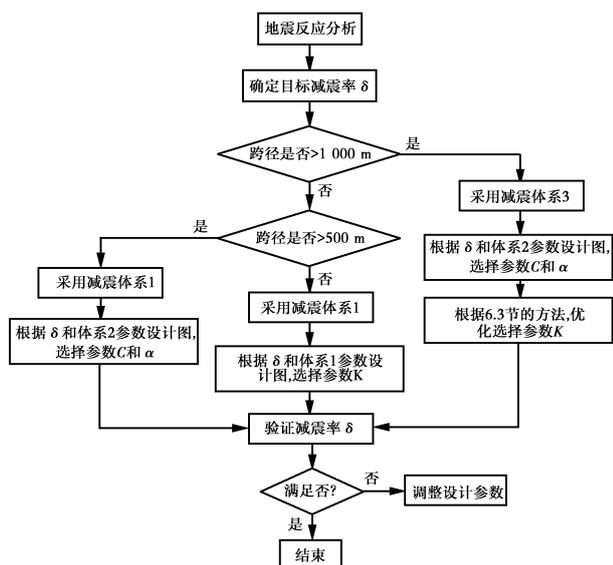


图 24 斜拉桥减震体系设计流程图

Fig. 24 Seismic-reduction systems design processes of CSBs

7 结论

- 1) 给出了近场非脉冲型地震波的生成方法。
- 2) 脉冲周期是该类桥梁脉冲型地震反应的控制参数,而剪切波速不是控制参数。脉冲长周期放大结构反应。
- 3) 弹性连接参数对脉冲地震动的反应灵敏性要

大于粘滞阻尼器参数。并联装置采用先确定阻尼装置参数值,后确定弹性连接装置参数值的优化方法。

4) 并联组合体系,对位移和内力控制均较好,达到了减震设计的目的,减小了位移,也控制了内力。

5) 建议了基于目标减震率的减震体系设计流程。

参考文献:

[1] 李小军,贺秋梅,元兴军.地震动速度脉冲对大跨斜拉桥减震控制的影响[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(2):272-285.
LI X J, HE Q M, QI X J. Seismic mitigation control effects of long-span cable-stayed bridges to ground motions with velocity pulse [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20 (2): 272-285. (in Chinese)

[2] 李勇,闫维明,陈彦江,等.大跨斜拉桥的近断层地震响应及减震控制[J].防灾减灾工程学报,2010,30(5):479-486.
LI Y, YAN W M, CHEN Y J, et al. Seismic response analysis and control of long-span cable-stayed bridges under near-fault earthquakes [J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering, 2010, 30 (5): 479-486. (in Chinese)

[3] ZHU J, ZHANG W, ZHENG K F, et al. Seismic design of a long-span cable-stayed bridge with fluid viscous dampers [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2016, 21(1):04015006-1-11.

[4] XU Y, WANG R L, LI J Z. Experimental verification of a cable-stayed bridge model using passive energy dissipation devices [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(12):04016092-1-19.

[5] 韩振峰,叶爱君.千米级斜拉桥的纵向减震体系研究[J].地震工程与工程振动,2015,35(6):64-70.
HAN Z F, YE A J. Research on the longitudinal earthquake-reduction system of cable-stayed bridges over kilometers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35 (6): 64-70. (in Chinese)

[6] MOHAMMED I, JOAN R C. Novel isolation device for protection of cable-stayed bridges against near-fault earthquakes [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(8): A4013002-1-12.

[7] GUAN Z G, YOU H, LI J Z. Lateral isolation system of a long-span cable-stayed bridge with heavyweight concrete girder in a high seismic region [J]. Journal of

- Bridge Engineering, 2017, 22(1):04016104-1-15.
- [8] 韩振峰, 叶爱君, 范立础. 千米级斜拉桥的动力几何非线性分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6):67-73.
HAN Z F, YE A J, FAN L C. Dynamic nonlinear analysis of cable-stayed bridges of kilometers length [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6):67-73. (in Chinese)
- [9] LI S, ZHANG F, WANG J Q, et al. Effects of near-fault motions and artificial pulse-type ground motions on super-span cable-stayed bridge systems [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(3):04016128-1-17.
- [10] 乔敏源. 近断层地震动作用下桥梁地震响应研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
QIAO M Y. Research on bridge seismic responses under the excitation of near-fault ground motions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [11] 徐艳, 黄永福, 李建中. 脉冲型地震作用下斜拉桥纵向响应的简化计算[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(2):41-47.
XU Y, HUANG Y F, LI J Z. Simplified calculation of longitudinal seismic response of cable-stayed bridges subjected to pulsed ground motions [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2015, 43(2):41-47. (in Chinese)
- [12] BIPIN S. Seismic response of long span cable-stayed bridge to near-fault vertical ground motions [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(1):180-187.
- [13] DOMANESCHI M, MARTINELLI L. Extending the benchmark cable-stayed bridge for transverse response under seismic loading [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(3):04013003-1-9
- [14] 袁一凡. 工程地震学[M]. 北京:地震出版社, 2012.
YUAN Y F. Engineering seismology [M]. Beijing: Earthquake Press, 2012. (in Chinese)
- [15] ADINA. User's guide [M]. Adina R & D, Inc., Watertown, MA, 2015.
- [16] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [17] 黄盛楠, 杨德圣, 宋波, 等. 大跨斜拉桥地震易损性分析[J]. 工程力学, 2014(Sup1):86-90.
HUANG S N, YANG D S, SONG B, et al. Seismic vulnerability analysis for long-span cable-stayed bridge [J]. Engineering Mechanics, 2014(Sup1):86-90. (in Chinese)
- [18] 张喜刚, 陈艾荣. 千米级斜拉桥设计指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2010.
ZHANG X G, CHEN A R. Design guide for cable stayed bridge of kilometers length [M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)