

近断层斜拉桥弹塑性索与阻尼器组合横向减震

管仲国¹, 游瀚¹, 郭河²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011)

摘要: 研究了近断层地震条件下, 使用弹塑性减震索和黏滞阻尼器组合体系进行横向减震的斜拉桥的地震响应和减震规律. 采用等效脉冲模型对实际近断层地震进行最小二乘拟合. 人工合成Ⅱ类场地下的模拟近断层地震波3组, 以永宁黄河大桥为工程背景, 对人工近断层地震输入进行非线性时程分析, 得到在不同脉冲周期的近断层地震作用下, 减震措施设计参数对于塔梁相对位移等响应的影响. 结果表明, 拟合近断层地震下结构响应与实际地震相差较小, 可以满足工程计算需求; 近断层地震易造成大位移响应, 弹塑性索参数设计时应使结构周期避开脉冲周期; 容许减震索进入塑性与保持弹性相比, 塔梁相对位移并不会明显增加, 甚至在一些情况下会减小.

关键词: 近断层地震; 弹塑性减震索; 黏滞阻尼器; 斜拉桥; 横向减震

中图分类号: U441⁺.3

文献标志码: A

Responses of Cable-Stayed Bridge Transversely Isolated with Elasto-Plastic Cable Pairs and Fluid Viscous Damper Subjected to Near Fault Ground Motions

GUAN Zhongguo¹, YOU Han¹, GUO He²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: The response feature of cable-stayed bridge with elastoplastic cable pairs and viscous damper adopted in lateral pylon seismic isolation design under near fault ground motions was investigated. Real near fault ground motions were simulated using the equivalent near fault pulse model, and the three sets of synthetic seismic waves with various pulse periods corresponding to II site condition are synthesized. Based on Yongning Yellow River Bridge, nonlinear time history analysis was performed under the synthetic near fault ground motions, and the effects of variation of design

parameters of isolation device on the seismic response of the bridge in terms of relative girder-pylon displacement were studied. The results show that the responses under synthetic ground motions are comparable to those records with the same pulse characteristics, which can satisfy the need of engineering practice. Near fault ground motions are likely to cause large displacement response. Therefore, it is strongly recommended that the natural period of the structure should be set apart from the pulse period by properly determining the design parameter of the elastoplastic cables. Allowing certain inelastic behavior of cables does not lead to the increase, sometimes even a decrease, of relative girder-pylon displacement response when compared with a hypothetical case where the cables behave elastically all along.

Key words: near fault ground motions; elastoplastic cable; viscous damper; cable-stayed bridge; transverse isolation

强震发生时靠近断层附近的结构破坏十分严重, 其破坏特征受强脉冲作用非常明显, 如美国的 Northridge 地震(1994年)、台湾地区的 ChiChi 地震(1999年)等, 因此, 近断层结构抗震问题受到关注. 通过对地震记录的研究, 人们总结了近断层地震区别于远场地震的特点, 包括方向性效应、滑冲效应、上盘效应等^[1]. 从动力作用机制上看, 近断层地震破坏性强的主要原因是其时域中常包含大幅值的长周期高能量脉冲, 会造成结构大的位移变形乃至破坏, 尤其对柔性、减隔震结构危害巨大^[2]. 相关研究表明, 近断层地震会明显增大减隔震桥梁的减隔震位移需求^[3], 过大的位移会超出连接装置的极限变形能力, 进而可能造成上、下部结构连接失效, 或者造成主梁与其他部位碰撞, 增大内力甚至发生破坏^[4-5].

大跨度斜拉桥一般是路网中的关键性连接点, 对于区域经济的运行影响显著. 为确保震后结构功

收稿日期: 2015-12-31

基金项目: 国家“九七三”基础研究发展计划(2013CB036302); 国家自然科学基金(51378384)

第一作者: 管仲国(1976—), 男, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: guanzhongguo@tongji.edu.cn

通讯作者: 游瀚(1992—), 男, 硕士生, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: youhan@tongji.edu.cn

能基本完整,减少修复,一般需要引入减震设计,即通过合理设置连接装置,将主体结构的内力和位移响应控制在合理范围内.斜拉桥塔梁之间的连接方式是影响斜拉桥响应的重要因素之一,其纵向一般是漂浮、半漂浮体系,利用阻尼、限位装置连接;在横桥向,为满足静力需求,塔梁一般设置抗风支座形成刚性连接,而刚性连接会把上部结构的惯性力传到下部结构,造成塔底剪力、弯矩过大.为同时满足静力条件所必需的约束刚度,以及地震作用下的必要变形与耗能,南京夹江大桥采用了E型钢阻尼器进行边墩和辅助墩的横向减震^[6],但由于钢阻尼器难以在有限的设计空间内同时满足大屈服承载力和大位移能力的需求,塔梁之间横向仍采用固定约束.希腊 Rion-Antirion 桥为实现塔梁横向减震,在塔梁横向设置了黏滞阻尼器、“熔断”约束装置,以适应结构在正常使用和强震作用下的不同约束要求^[7],但“熔断”约束装置构造复杂,其破断瞬间对结构的冲击影响尚不明确.甘肃永宁黄河大桥为混凝土主梁斜拉桥,位于8度高烈度区,为解决塔梁横向抗震问题,采用弹性索与黏滞阻尼器并联的减、隔震设计方案,既提供了正常使用状态下必要的侧向约束刚度($52 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$),同时在地震下也具有较弱的回复力(13 MN)、较大的变形能力($\pm 250 \text{ mm}$)和适当的耗能特性(等效阻尼比 7.9%)^[8].且进一步分析表明,容许拉索产生一定的塑性行为,在对应 1.5% 的极限应变条件下(索丝的极限应变 $\geq 3.5\%$),现有主塔结构在 1.6 倍罕遇地震作用下仍可保持弹性,减震索变形能力可增加至 $\pm 490 \text{ mm}$.由此可见,容许减震索进入适度的塑性可以显著提升其变形能力,为有效应对近断层地震等极端强震作用提供了可能,并且拉索进入塑性后也可限制主梁对主塔的最大传力.此外,考虑拉索只受拉不受压的特点,虽然其进入塑性后不能像钢阻尼器那样提供往复耗能,但近断层地震的高能量脉冲作用也多为单次脉冲.

为此,本文采用等效脉冲模型人工合成 II 类场地的模拟近断层脉冲型地震波,以永宁黄河斜拉

桥为研究对象,通过数值模型分析,研究采用弹塑性减震索与黏滞阻尼器组合的横向抗震体系在近断层脉冲型地震作用下的响应特点,进而分析其适用性及合理参数设置问题.

1 近断层地震模拟

近断层地震波大部分能量集中在很窄的频率带,表现为时程开始阶段的大速度脉冲,这种窄带特性表明可以用等效数学脉冲模型来模拟近断层地震波.目前有较多对脉冲模型的研究,如 Makris 等^[9]的简谐函数, Agrawal 等^[10]的简谐函数乘包络函数, Mavroeidis 等^[11]的小波函数形式.这里用脉冲模型模拟近断层地震,以便分析脉冲的不同特性对减震系统的影响.

Makris 等^[9]用简谐函数模拟近断层地震波脉冲成分,提出 3 种脉冲数学模型: Type-A, Type-B 和 Type-C,其公式简洁,能够体现脉冲主要特点,故应用广泛.其中 Type-A 速度脉冲为余弦函数形式,代表滑冲效应引起的单向速度脉冲; Type-B 速度脉冲为正弦函数形式,代表方向性效应引起的双向速度脉冲; Type-C 则模拟具有多个循环的速度脉冲.这里主要研究方向脉冲,所以采用 Type-B 脉冲模型,解析函数如下:

$$\begin{cases} \ddot{u}_g(t) = \omega_p v_p \cos(\omega_p t), & 0 \leq t \leq T_p \\ \dot{u}_g(t) = v_p \sin(\omega_p t), & 0 \leq t \leq T_p \\ u_g(t) = \frac{v_p}{\omega_p} - \frac{v_p}{\omega_p} \cos(\omega_p t), & 0 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\ddot{u}_g(t)$, $\dot{u}_g(t)$, $u_g(t)$ 分别为脉冲加速度、速度、位移; v_p 为速度脉冲幅值; T_p 为脉冲周期; ω_p 为脉冲圆频率, $\omega_p = 2\pi/T_p$. Type-B 脉冲模型如图 1 所示.

对于脉冲参数的取值, Makris 等^[12]对实际近断层地震进行了拟合,其脉冲周期 T_p 范围为 $1.3 \sim 7.0 \text{ s}$, 幅值 v_p 范围为 $0.5 \sim 1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Mavroeidis 等^[11,13]同样拟合实际近断层地震,其脉冲周期 T_p 范

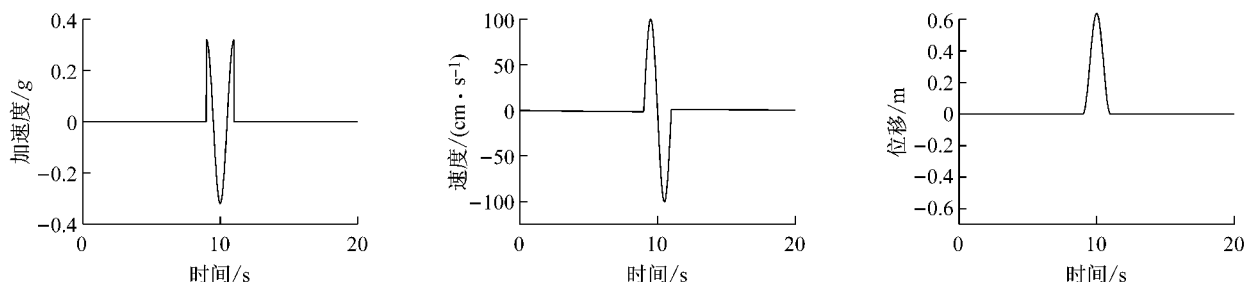


图1 Type-B脉冲模型示意

Fig.1 Type-B pulse model

围为 0.7~12.0 s,幅值 v_p 范围为 0.7~1.3 m·s⁻¹,建议取 1.0 m·s⁻¹. 本文从太平洋地震工程研究中心(PEER)的新一代地震动衰减项目西部第二版(NGA-west2)数据库上选取 5 条具有典型方向脉冲特征的地震记录,其中断层距 $R < 15$ km,矩震级 $M > 6.5$,脉冲周期 T_p 为 1.0~5.0 s. 利用最小二乘法对最大的脉冲进行拟合^[14],拟合参数包括脉冲开始时间 t_0 ,脉冲周期 T_p ,脉冲幅值 v_p . 经过多次试算和迭代,在数据长度 $[t_0, t_0 + T_p]$ 内,以拟合脉冲 Y_i

与地震记录 X_i 的残差平方和 $R = \sum_i^n (Y_i - X_i)^2$ 最小,寻找相应的 t_0, T_p, v_p . 拟合中没有以单个峰值相等为条件,仅对拟合峰值和实际峰值相差较大的情况予以剔除,最终得到简化脉冲模型的参数(表 1). 图 2 为编号 2 地震记录的拟合情况分析,可以看出脉冲模型的速度时程、反应谱中长周期部分与实际地震波均基本相似,也表明了脉冲型地震低频成分对中长周期结构起主要影响作用.

表 1 实际近断层地震参数

Tab.1 Records of near fault ground motions

编号	地震名	台站及方向编号	断层距/km	拟合脉冲周期/s	拟合脉冲幅值/(m·s ⁻¹)
1	Northridge-01	RRS228	6.50	1.03	117.40
2	El Centro Array #3	H_H-E03140	12.85	2.60	31.20
3	Landers	LCN260	2.19	4.96	81.50
4	El Centro Array #4	H_H-E04230	7.05	3.90	68.90
5	El Centro Array #5	H_H-E05230	3.95	3.44	79.10

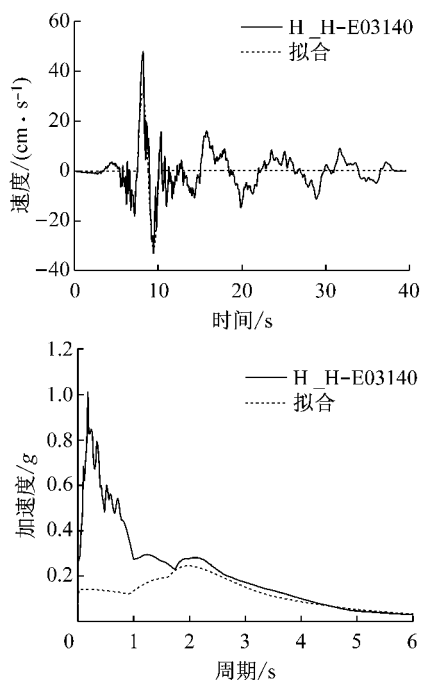


图 2 近断层地震拟合

Fig.2 Simulation of near fault ground motions

解析脉冲波的波形比较光滑,频带较窄,且缺乏高频成分;而实际近断层地震传播距离短,富含高频分量,为了能反映实际地震建议将脉冲与非脉冲地震波叠加^[15]. 一些研究中^[16-17]以实际无脉冲地震记录为背景,通过叠加等效脉冲模型来人工合成近断层地震,既能引入该类场地土的局部特性,又能反映近断层的脉冲效应. 这里采用类似方法,在不含脉冲地震波上叠加脉冲模型,保持速度峰值出现时间相

同,如图 3 所示. 其中所采用的无脉冲地震波见表 2,峰值加速度(PGA)统一为 0.28g,适用于Ⅱ类场地. 共合成 3 组人工波 W1, W2, W3, 每组所叠加脉冲的脉冲周期 $T_p = 1.0 \sim 4.0$ s, 脉冲幅值 $v_p = 0.7$ m·s⁻¹.

表 2 无脉冲地震动

Tab.2 Non-pulse like ground motions

人工波	地震名	台站及方向编号	矩震级	剪切波速/(m·s ⁻¹)
W1	Imperial Valley-02	ELC180	6.95	213.44
W2	Loma Prieta	FRE000	6.93	367.57
W3	Northridge-01	BLD090	6.69	297.07

2 斜拉桥模型

以永宁黄河大桥作为工程背景,其主桥为 110 m+260 m+110 m 的双塔双索面斜拉桥(图 4);主梁为变截面连续箱梁;主塔为钻石型混凝土塔;边墩采用柱式薄壁墩,无辅助墩;基础全部采用钻孔灌注桩. 利用 Sap2000 平台,建立斜拉桥、减震系统三维有限元模型,其中桥塔、桥墩、主梁、拉索均采用空间梁柱单元进行模拟. 主塔下要考虑冲刷作用,按高桩承台进行建模;而边墩不用考虑冲刷,直接用质点模拟承台,用六弹簧子结构模拟桩基础,土弹簧刚度通过 m 法获得. 在主桥弹性模型上增加非线性连接单元用以模拟各种减震装置.

横桥向减震体系设计为每个塔梁横向设置两对弹塑性索和一个黏滞阻尼器. 其中弹塑性索即钢绞

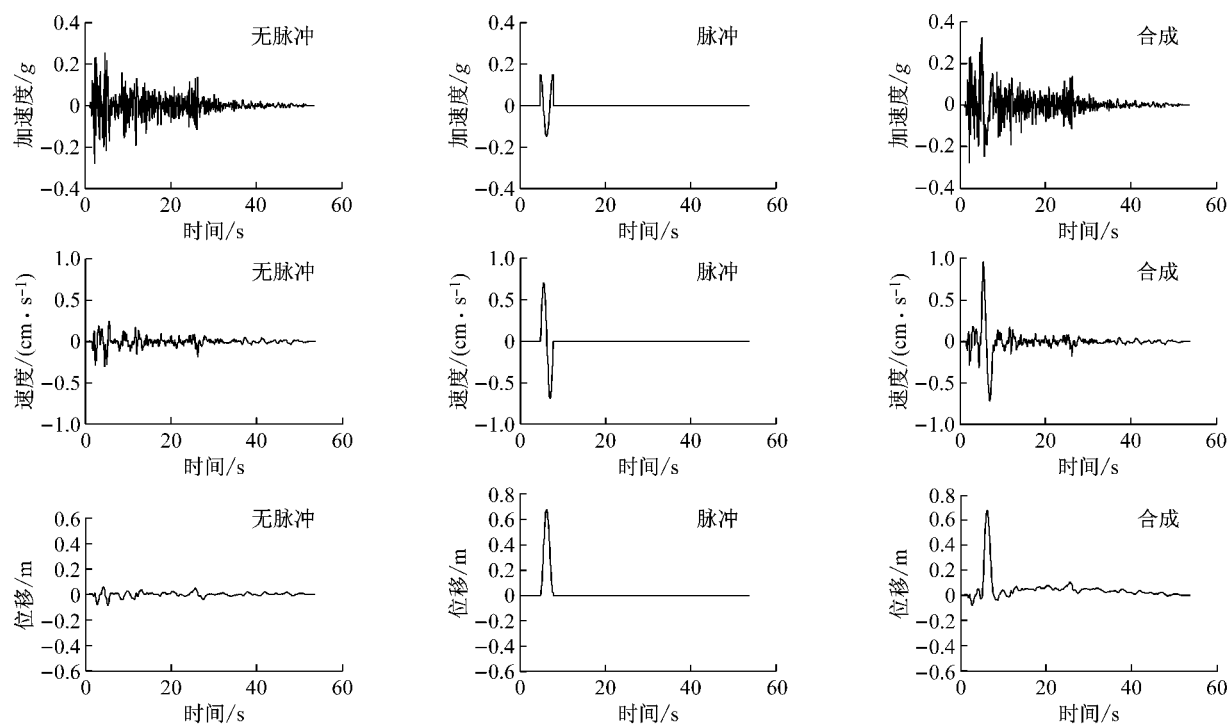


图 3 人工合成近断层地震图示

Fig.3 Synthetic near fault ground motions

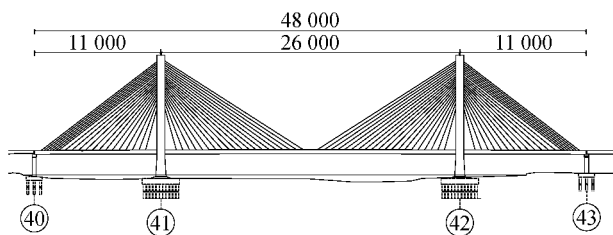


图 4 斜拉桥总体布置(单位:cm)

Fig.4 Configuration of cable-stayed bridge(unit: cm)

线拉索,在塔梁之间成对设置作为连接装置. 索的本构关系可采用双线性模型模拟. 弹塑性索用 Plastic-Wen 单元与 hook 单元串联进行模拟,索丝的本构关系参照文献[18]3. 2. 4 中 1 725 MPa 钢绞线的应力应变关系.

$$f_{ps} = \begin{cases} 196\,500\epsilon_{ps}, & \epsilon_{ps} \leq 0.007\,6 \\ 1\,725 - \frac{1.72}{\epsilon_{ps}}, & \epsilon_{ps} > 0.007\,6 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{ps} 为索丝应力,MPa; ϵ_{ps} 为索丝应变. 记有效索长为 L ; 索丝数目为 N ; 拉索的屈服位移 $S_y = 0.007\,6L$; 初始刚度 $K_1 = EA/L$, 其中拉索面积 $A = N\pi d^2/4$, 弹性模量 $E = 196.5\text{ GPa}$; 屈服力 $F_y = K_1 S_y$. 永宁黄河桥减震索有效索长为 33 m, 由此确定拉索屈服位移 $S_y = 0.007\,9 \times 33 = 0.26\text{ m}$, 屈后刚度与初始刚度比 $K_2/K_1 = 0.015$, 不同索丝参数下的拉索弹性刚度、屈服力以及结构横向基本周期等参数见表 3. 黏滞阻尼器采用 Damper 单元模拟, 为简

化起见,该设计参数未作优化,取值与实桥相同^[8]: 阻尼指数 $\alpha = 0.3$, 阻尼系数 $C = 2\,500\text{ kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-0.3}$

表 3 塔梁弹塑性索力学参数取值

Tab.3 Mechanical parameters of elastoplastic cable				
工况	单股索 索丝数	横向基本 周期/s	总弹性刚度/ (kN·m ⁻¹)	总屈服力/ kN
1	37	4.723	16 949	4 420
2	73	4.090	33 440	8 721
3	121	3.550	55 428	14 456
4	187	3.090	85 662	22 341
5	253	2.790	115 895	30 226
6	301	2.630	137 883	35 961
7	367	2.458	168 117	43 846
8	409	2.450	187 356	48 864
9	450	2.446	206 137	53 763

3 结构响应分析

3.1 实际地震与人工地震对比

将实际近断层地震和人工拟合地震(表 1)作为输入,分析结构响应差异(减震索参数为表 3 中工况 3). 其中塔梁相对位移、塔底弯矩响应如图 5 所示. 从图 5 中可以看出,表 1 人工拟合脉冲型地震作用下结构响应与实际地震下响应基本一致,可以满足工程计算需求.

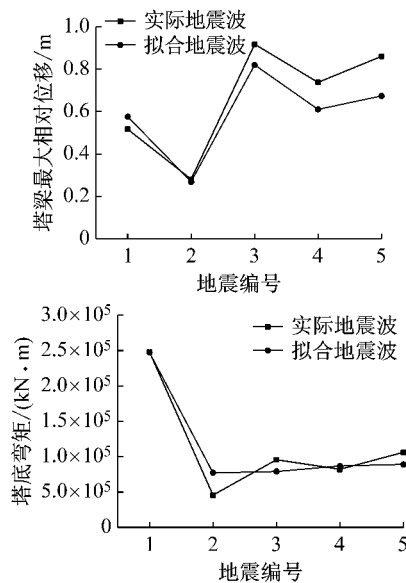


图 5 结构响应结果对比

Fig.5 Comparison of structural response

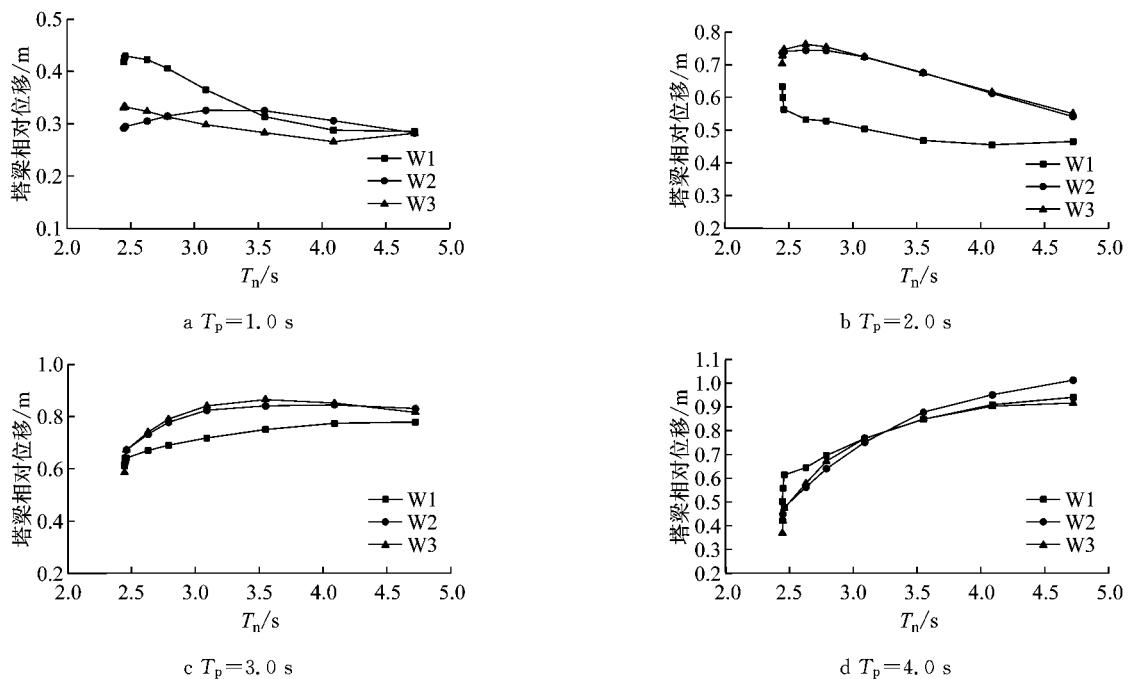


图 6 不同结构周期与脉冲周期下的相对位移响应

Fig.6 Relative displacement response with various natural period and pulse period

与结构周期接近时会出现大位移响应,而当结构周期远离脉冲周期时,最大相对位移会有所减小.可见通过改变结构周期,在远离脉冲周期的情况下可以对塔梁相对位移进行控制,所以实际设计减震参数时,应尽可能让结构横向基本周期避开脉冲的周期.

3.3 弹塑性索与弹性索对比

为了研究容许减震索进入塑性后对塔梁相对位移的影响,另假设一弹性索分析工况,其拉索刚度等于弹塑性索初始刚度,并始终保持弹性状态,以进行

3.2 结构周期与脉冲周期

在 3.1 节基础上,将 3 组人工波输入并对减震系统参数进行分析.其中中塔阻尼系数 $C=2\,500\text{ kN}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{-0.3}$ 不变,中塔索丝数量 N 取 37~450,结构横向基本周期从 4.7 s 变化到 2.5 s(表 3).塔梁相对位移响应等同于减震装置(索、阻尼器)的变形,是体现减震装置性能的重要指标,故重点分析各工况下索丝数量改变对塔梁相对位移的影响.

绘制塔梁相对位移随结构横向基本周期(T_n)变化曲线(图 6),可以发现近断层地震会造成大位移响应,但不同的脉冲输入下表现出不同的效果,具有一定规律性.在脉冲周期较小时($T_p=1.0\text{ s}, 2.0\text{ s}$),增大结构周期对减小位移响应较为有利,而在脉冲周期较大时($T_p=3.0\text{ s}, 4.0\text{ s}$),增大周期反而不利.

以脉冲周期 T_p 与结构周期 T_n 的比值作为横坐标,绘制响应变化曲线(图 7).可以看出,在脉冲周期

对比.图 8 所示为人工波 W1, W2 系列中 $T_p=3.0\text{ s}$ 时对应表 3 中全部索丝分析工况的结果.从图 8 中可看出,采用弹塑性索后,塔梁相对位移与弹性工况相比并无明显增加趋势,甚至在一些工况下还会出现弹性工况位移需求更大的情况.图 9 所示为两组波中工况 3 的位移响应时程,可以看出,塔梁相对位移的变化与速度脉冲具有类似的谐波形式,且一般在首个脉冲波峰或者波谷达到最大值,此后,弹塑性索工况因为耗能而迅速衰减,而弹性索工况则表现

出明显的往复振荡趋势. 由于近场脉冲波一般仅包含一个高能量脉冲, 故拉索进入塑性后的松弛并不会导致塔梁相对位移的增加. 图 10a 为人工波 W1 系列 $T_p=3.0$ s 作用下分别按弹塑性索和弹性索得到的塔梁横向连接滞回性能对比, 其中减震索采用工况 3 实桥设计参数; 图 10b 为人工波 W1 系列 $T_p=3.0$ s 作用下的各工况塔底弯矩对比. 可见, 容许减震索进入塑性可以较好地控制上、下部结构之间的最大传力, 进而降低塔底弯矩响应.

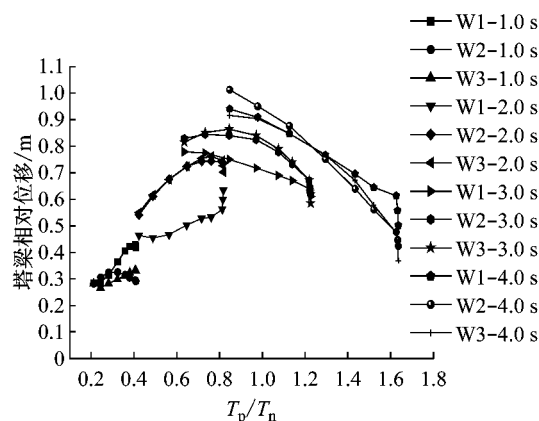
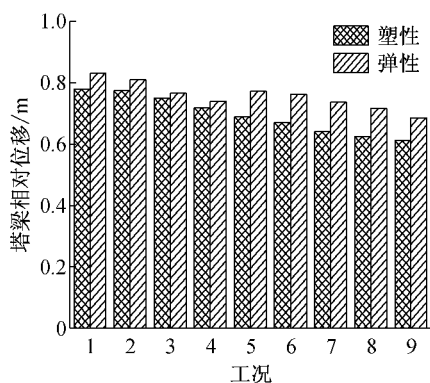
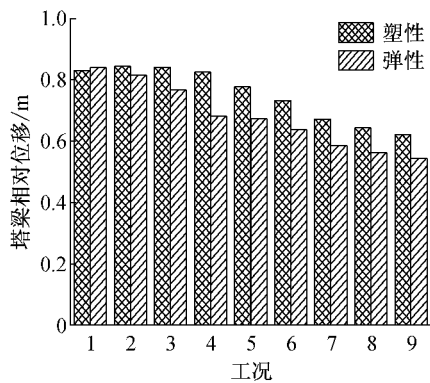


图 7 周期比与塔梁相对位移关系

Fig.7 Period ratio and relative displacement relation



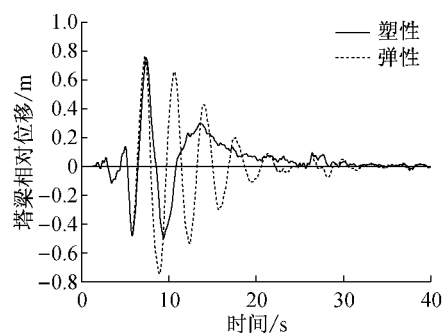
a 人工波 W1



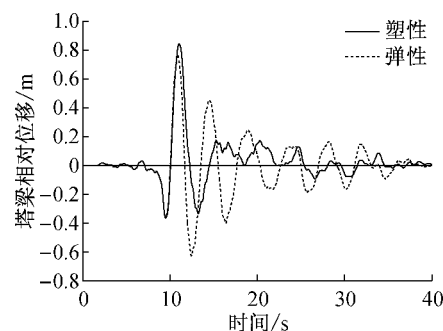
b 人工波 W2

图 8 位移响应对比 ($T_p=3.0$ s)

Fig.8 Comparison of displacement response ($T_p=3.0$ s)



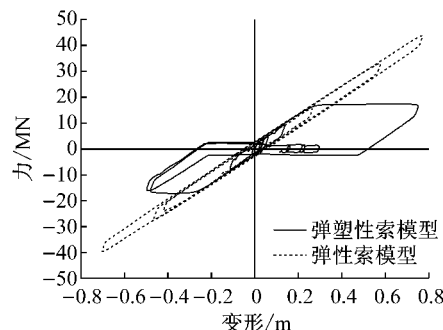
a 人工波 W1



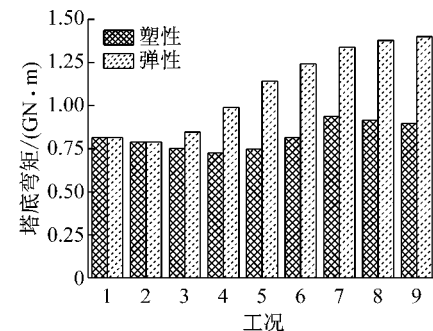
b 人工波 W2

图 9 位移响应时程对比 ($T_p=3.0$ s)

Fig.9 Comparison of displacement time history ($T_p=3.0$ s)



a 塔梁横向连接



b 塔底弯矩

图 10 塔梁横向连接滞回性能与塔底弯矩响应对比 (W1, $T_p=3.0$ s)

Fig.10 Comparison of hysteresis behavior of lateral girder-tower connections and base bending moment of towers (W1, $T_p=3.0$ s)

4 结论

近断层地震能量集中在地震发生时较短时间段内,表现为时域的大脉冲,是更难控制的极端强震。本文分析了近断层地震作用下主塔横桥向减震斜拉桥的响应特点,并对减震系统适用性及合理的设计参数选取进行了分析,得出以下结论:

(1)近断层地震响应计算中,应用简化脉冲模型可以反映近断层地震的主要特点,并能够满足工程计算精度要求,是一种可行的方法。

(2)针对不同脉冲波的分析表明,在近断层地震作用下,脉冲周期是一个显著影响结构响应的参数,特别是脉冲周期与结构基本周期接近时,响应值很大。设计上可通过改变索丝用量使结构的横向基本周期避开脉冲周期,以减少位移响应。

(3)容许减震索进入适当塑性并不会明显增大结构相对变形需求,有利于控制上、下部结构之间的最大传力,进而对结构提供良好的保护。

参考文献:

- [1] Somerville P G, Smith N F, Graves R W, *et al.* Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity [J]. *Seismological Research Letters*, 1997, 68(1): 199.
- [2] Bray J D, Rodriguez-Marek A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(11): 815.
- [3] Dicleli M. Performance of seismic-isolated bridges in relation to near-fault ground-motion and isolator characteristics [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(4): 887.
- [4] Jónsson M H, Bessason B, Haflidason E. Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(6): 447.
- [5] Dimitrakopoulos E, Makris N, Kappos A J. Dimensional analysis of the earthquake-induced pounding between adjacent structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2009, 38(7): 867.
- [6] GUAN Zhongguo, LI Jianzhong, XU Yan. Performance test of energy dissipation bearing and its application in seismic control of a long-span bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(6): 622.
- [7] Infanti S, Papanikolas P, Benzoni G, *et al.* Rion-Antirion Bridge: design and full-scale testing of the seismic protection devices [C] // *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver: FIP Industriale, 2004: Paper No. 2174.
- [8] GUAN Zhongguo, LI Xiaobo, LI Jianzhong. An innovative isolation system for lateral seismic control of a cable-stayed bridge with heavy deck [C] // *IABSE Symposium Report*. Geneva: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2015, 105(8): 1-8.
- [9] Makris N, Chang S P. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2000, 29(1): 85.
- [10] Agrawal A K, He W L. A close-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures [C] // *ASCE Engineering Mechanics Conference*. New York: Columbia University, 2002: Paper No. 367.
- [11] Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(3): 1099.
- [12] Makris N, Black C J. Evaluation of peak ground velocity as a "good" intensity measure for near-source ground motions [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(9): 1032.
- [13] Mavroeidis G P, Dong G, Papageorgiou A S. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(9): 1023.
- [14] 黄永福. 近断层地震作用下斜拉桥粘滞阻尼器参数简化设计方法 [D]. 上海: 同济大学, 2015.
HUANG Yongfu. Simplified method of parameter design for viscous damper to near-fault cable-stayed bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [15] Farid Ghahari S, Jahankhah H, Ghannad M A. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(7): 536.
- [16] Park S W, Ghasemi H, Shen J, *et al.* Simulation of the seismic performance of the Bolu Viaduct subjected to near-fault ground motions [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33(13): 1249.
- [17] Rodriguez O. Bridge design for earthquake fault crossings: synthesis of design issues and strategies [D]. Los Angeles: California Polytechnic State University, 2012.
- [18] Caltrans S D C. Caltrans seismic design criteria [R]. Sacramento: California Department of Transportation, 2013.