

地震频谱特性对独塔斜拉桥纵向地震响应影响

易江¹, 刘闯², 李建中¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 以一座实际的独塔斜拉桥为背景, 分别以速度脉冲波和实际地震波作为地震动输入, 研究了不同频谱特性地震动输入下独塔斜拉桥地震响应特点. 结果表明, 近断层地震动的长周期速度脉冲对独塔斜拉桥的地震响应影响显著, 特别是当地震动峰值速度(V_p)与地面运动峰值加速度(a_p)比值较大时, 速度脉冲波的周期与主梁第一阶竖弯振动周期接近, 塔柱、梁体、拉索和支座等受力明显增加, 并可能出现支座脱空和拉索松弛等现象. 进一步研究了支座脱空和拉索松弛现象, 结果表明, 支座脱空和拉索松弛对主梁位移、拉索索力和支座竖向反力等响应的影响较大, 不考虑支座脱空和拉索松弛可能会低估梁体位移和拉索的地震响应.

关键词: 桥梁工程; 独塔斜拉桥; 地震频谱特性; 地震响应; 拉索松弛; 支座脱空

中图分类号: U442.5⁺5; U448.27

文献标志码: A

Influence of Ground Motion Frequency Characteristics on Longitudinal Seismic Response of Single Tower Cable-stayed Bridges

YI Jiang¹, LIU Chuang², LI Jianzhong¹

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, China)

Abstract: Based on a real single-tower cable-stayed bridge, both velocity pulses and real earthquake waves are used to study the influence of ground motion frequency characteristics on seismic behavior of single-tower cable-stayed bridges. The analysis results show that long duration velocity pulse contained by near-fault ground motions have significant effects on the seismic response of single-tower cable-stayed bridges. Especially, when the ratio of peak ground velocity (V_p) to peak ground acceleration (a_p) is large, the period of velocity pulses gets close to the period of 1st vertical bending mode of the bridge, and thus the response of the tower, girder, cables

and bearings increases significantly with possibility that cable relaxation and end span uplift might occur. The results show that cable relaxation and end span uplift have a significant influence on the response of the structure like deck displacement, cable axial force and bearing vertical reactions. The response of the deck displacement and cable axial force would possibly be underestimated if neglecting influence of cable relaxation and end span uplift.

Key words: bridge engineering; single tower cable-stayed bridge; ground motion frequency characteristics; seismic behavior; cable relaxation; end span uplift

由于外型美观、结构受力合理, 斜拉桥在世界范围内得到广泛应用. 目前, 国内对斜拉桥抗震性能的研究多集中在双塔斜拉桥, 对独塔斜拉桥抗震性能的研究还较少. 与常见的双塔斜拉桥相比, 独塔斜拉桥的中边跨比、跨高比等设计参数有所不同^[1], 边界条件存在差异, 在地震作用下结构的地震响应应具有自身的特点. 黄小国等^[2]研究了地震作用下独塔斜拉桥的合理约束体系, 建议纵桥向采用漂浮体系, 并采用弹性索和阻尼器控制梁体位移. 在 1999 年集集地震中, 一座独塔斜拉桥——集鹿大桥, 遭受了严重的损伤, 震害主要包括塔身中部开裂、拉索松弛, 过渡墩处梁体与支座分离(支座脱空)等^[3-4]. 黄学漾等^[5]结合振动台试验对独塔斜拉桥非线性特性进行了模拟, 再现了独塔斜拉桥模型支座破坏和拉索脱锚现象.

另一方面, 结构的地震响应受地震动频谱特征的影响很大. 近年来数次大地震中, 如 1995 年日本阪神地震、1999 年台湾集集地震和 2008 年汶川地震, 都记录到了一定数量的近断层地震动. 此类地震动通常含有长周期的速度脉冲, 较大的速度峰值以及丰富的长周期谱值成分等^[6]. 而由于斜拉桥自振

收稿日期: 2016-08-09

基金项目: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室自主课题(SLDRCE15-A-01)

第一作者: 易江(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: 1310225@tongji.edu.cn

通讯作者: 李建中(1963—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: 0001@tongji.edu.cn

周期较大,近断层地震动长周期成分将会对结构的地震响应产生显著的影响^[7].近年来,部分学者对斜拉桥在近断层地震作用下的抗震性能做了一定研究.如 Wesolowsky 等^[8]研究了近场地震作用下采用铅芯橡胶支座对斜拉桥的减震效果;蔡茂江等^[9]针对斜拉桥半漂浮体系分析了近场地震作用下粘滞阻尼器合理的参数;徐艳等^[10]提出了脉冲型地震输入时斜拉桥纵向地震响应的简化计算方法.

但以上研究还存在一定的局限性:①大多只关注塔底弯矩、梁端位移的地震响应,缺乏对主梁、拉索和支座等受力和变形的研究;②分析时还较少考虑到独塔斜拉桥可能出现支座脱空和拉索松弛的现象.为了揭示独塔斜拉桥在近断层地震作用下的地震响应特点,本文以一座实际的独塔斜拉桥为背景,研究了独塔斜拉桥结构地震响应与地震频谱特性的关系,重点探讨不同地震动频谱特性输入下独塔斜拉桥支座脱空和拉索松弛现象以及支座脱空和拉索松弛对结构抗震性能的影响.

1 背景工程与动力模型

1.1 工程背景

背景工程为跨径布置为(230+230)m的双索面独塔斜拉桥(图1),主塔为“A”型混凝土桥塔,塔底至横梁、横梁至塔柱交叉点以及塔柱上部分别高34m、62m和54m,总高150m;主梁为流线型扁平钢箱梁,采用Q345钢材,桥宽为33m;全桥共采用 $2 \times 34 = 68$ 根拉索,并对一侧拉索从梁端至塔侧按C1~C17进行编号,以便于后续说明;主塔、桥墩均采用纵向活动支座.背景工程的总体布置图和桥塔立面图如图1所示.

1.2 基准模型

首先,不考虑支座脱空和拉索松弛,采用有限元软件SAP2000,建立了背景工程的三维有限元基准模型.主塔、主梁、过渡墩均采用空间弹性梁单元模拟.主塔和过渡墩单元长度约为3m,主梁单元长度约为6m,全桥共建立了105个主塔单元、48个过渡墩单元和80个主梁单元;主塔、过渡墩和主梁的质量与自重均通过赋予截面面积和密度来实现,主梁二期恒载以线质量形式加在梁单元上.拉索采用空间杆单元模拟,采用Ernst等效弹模来考虑拉应力和自重垂度的影响.塔、墩基础为群桩,采用空间六弹簧模型模拟群桩基础的刚度,弹簧刚度根据土层状况和桩的布置形式按静力等效原则确定(“m

法”).模型中总体坐标系以顺桥向为 x 轴,横桥向为 y 轴,竖向为 z 轴.过渡墩和主塔处支座在竖向固定处理,纵向滑动支座用双线性理想弹塑性弹簧连接单元代表,主要的力学参数包括屈服力 F_y 和屈服位移 X_y , X_y 一般取2mm.屈服力 F_y 计算公式为

$$F_y = \mu N \quad (1)$$

式中: N 为支座的成桥压力; μ 为摩擦系数,一般取为0.02^[11].

为了考虑恒载的影响,赋予主塔、过渡墩和主梁等弹性梁单元恒载轴力,形成恒载下的几何刚度,对弹性梁单元刚度进行修正.其中,恒载内力根据斜拉桥施工过程,采用Midas^[12]计算获得.

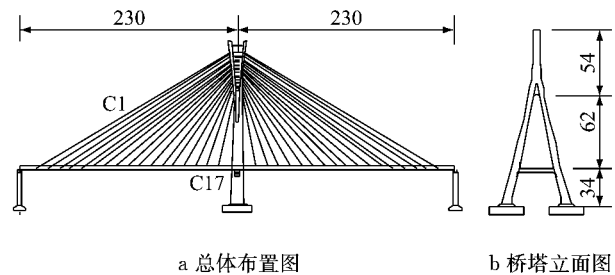


图1 某实际独塔斜拉桥布置图(单位:m)

Fig.1 Configurations of a real single tower cable-stayed bridge (unit: m)

1.3 支座脱空和拉索松弛的模拟

为了研究支座脱空和拉索松弛的对独塔斜拉桥地震反应的影响,在上述基准模型的基础上,对支座脱空和拉索松弛现象进行了模拟.

(1) 支座脱空的模拟

在成桥状态下,支座在竖向承担一定的压力.在地震作用下,支座竖向反力由支座成桥压力和地震反力组成.地震中,当支座所受到的地震竖向拉力小于支座成桥压力(相当于预压力),支座可以承受地震拉力,当地震作用下支座所受拉力大于支座成桥压力,支座将会脱空,不能继续承受拉力,如图2a所示.考虑支座成桥压力,地震作用下支座脱空的竖向力-位移关系如式(2)所示:

$$R = \begin{cases} K_1 x, & x \leq R_1 / K_1 \\ R_1, & x > R_1 / K_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: R 为地震作用下支座的竖向反力(受拉为正,受压为负); x 为地震位移; R_1 为支座成桥压力; K_1 为支座竖向刚度.

需要注意的是,从式(1)可知,支座动轴力变化会影响滑动摩擦支座水平向力学特性.但对于半漂浮体系斜拉桥,主梁恒载主要由拉索承担,支座成桥竖向反力较小;同时,支座滑动摩擦系数较小,仅为

0.02^[11],滑动支座的摩擦效应对结构地震响应的影响较小.为了便于计算,上述模型没有考虑支座竖向反力变化对滑动支座水平向力学特性的影响.

(2) 拉索松弛的模拟

由于斜拉桥在成桥状态,斜拉索都有预拉力(拉索成桥索力).在地震作用下,当地震作用产生的斜拉索压力小于拉索成桥索力,斜拉索可以承受压力,当地震作用下产生的斜拉索压力大于拉索成桥索力,斜拉索将产生松弛,不能继续承受压力,如图 2b 所示.考虑拉索成桥索力、拉索松弛,地震作用下拉索的力和位移关系如式(3)所示:

$$F = \begin{cases} -F_2, & x \leq -F_2/K_2 \\ K_2 x, & x > -F_2/K_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: F 为地震作用下拉索轴力(受拉为正,受压为负); x 为拉索轴向变形; F_2 为拉索成桥索力; K_2 为拉索轴向刚度 $K_2 = E_s A/L$,其中 E_s 为 Ernst 公式修正的等效弹性模量, A 为拉索截面面积, L 为拉索长度.

拉索采用空间杆单元模拟,根据索的长度,将一根拉索划分为 3~5 个空间杆单元,杆单元的轴向力—位移关系采用式(3),来描述拉索的松弛现象.需要注意的是,虽然理论上拉索轴向刚度随着拉索轴力的改变而变化,但研究表明^[13],斜拉索索力变化对结构的地震响应影响较小,可忽略不计;因而本文没有考虑拉索动轴力对轴向刚度的影响,式(3)中拉索的轴向刚度取定值.

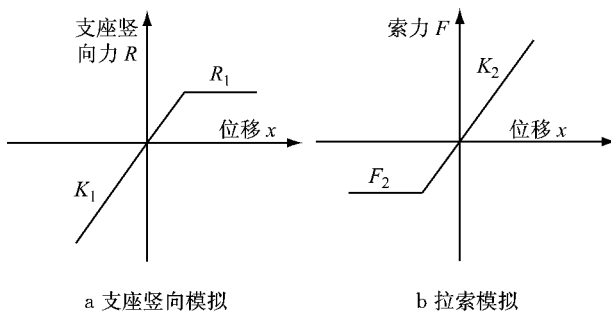


图 2 地震作用下支座脱空和拉索松弛的模拟

Fig.2 Model of bearing and cables in seismic analysis

根据基准模型,表 1 给出了该桥前 8 阶模态分析的结果.从表 1 可知,该桥第一阶纵飘周期较长,达到了 5.97 s,结构的前几阶高阶振动主要是主梁的竖向振动.

2 地震动输入

研究表明^[14]:地震动频谱特征可以通过地震动

表 1 模态分析结果

编号	周期/s	振型描述	编号	周期/s	振型描述
1	5.97	主梁纵漂	5	1.02	主梁横向振动
2	2.83	主梁反对称竖弯	6	1.00	主梁反对称竖弯
3	1.47	主梁对称竖弯	7	0.91	主梁对称竖弯
4	1.12	主梁横向振动	8	0.70	主塔横向振动

峰值速度 V_p (peak ground velocity)与地面运动峰值加速度 a_p (peak ground acceleration)的比值 V_p/A_p 来衡量.一般来说,近场脉冲型地震动 V_p/A_p 值较大,特征周期较长;而常规远场地震动 V_p/A_p 值较小,特征周期较短.为了深入探讨地震动频谱特性对独塔斜拉桥地震响应的影响,采用了如下两组地震动作为地震输入,输入方向为纵桥向.

第一组地震动为模拟的速度脉冲波.这类波具有形式简单且计算方便的特点,可以用来快速地甄别地震频谱特性与结构响应之间的关系,确定结构在地震作用下的薄弱部位.其中,具有代表性的速度脉冲波模型是 Makris 等^[15]提出的 Type-B 模型.该模型能模拟近场地震动的双向速度脉冲,应用较广泛,表达式为

$$V(t) = V_p \sin(\omega t), \quad 0 \leq t \leq T_g \quad (4)$$

式中: $V(t)$ 为近断层速度脉冲时程; V_p 为地面峰值速度; ω 为脉冲圆频率; T_g 为脉冲周期, $T_g = 2\pi/\omega$.对速度脉冲时程进行求导则可得地面运动的加速度时程 $A(t)$:

$$A(t) = \omega V_p \cos(\omega t), \quad 0 \leq t \leq T_g \quad (5)$$

由式(4)可得地面运动峰值加速度 A_p :

$$A_p = \omega V_p \quad (6)$$

故 V_p/A_p 比值:

$$V_p/A_p = V_p/\omega V_p = 1/\omega = T_g/2\pi \quad (7)$$

考虑实际地震动可能的频谱特性,本文根据 Type-B 模型模拟了 6 条速度脉冲波, V_p/A_p 的取值为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5,对应的脉冲周期 T_g 为 0.314、0.628、1.256、1.885、2.513 和 3.142 s.假设 $A_p = 0.6g$,可得 6 条波速度时程和加速度反应谱曲线(3%的阻尼比)如图 3 所示.从图 3a 可见,随着 V_p/A_p 值的增加,不仅速度脉冲波对应的周期 T_g 增加,而且速度时程峰值也相应增加.从图 3b 看到,随着 V_p/A_p 值的增加,加速度反应谱的峰值保持不变,但峰值向长周期偏移.

第二组地震动采用实际的地震波,从太平洋地震工程中心的地震波数据库和台湾中央气象局的灾害地震库选择了 10 条实际地震波,并将 10 条波的加速度峰值统一调整至 0.6g 作为水平地震输入.10

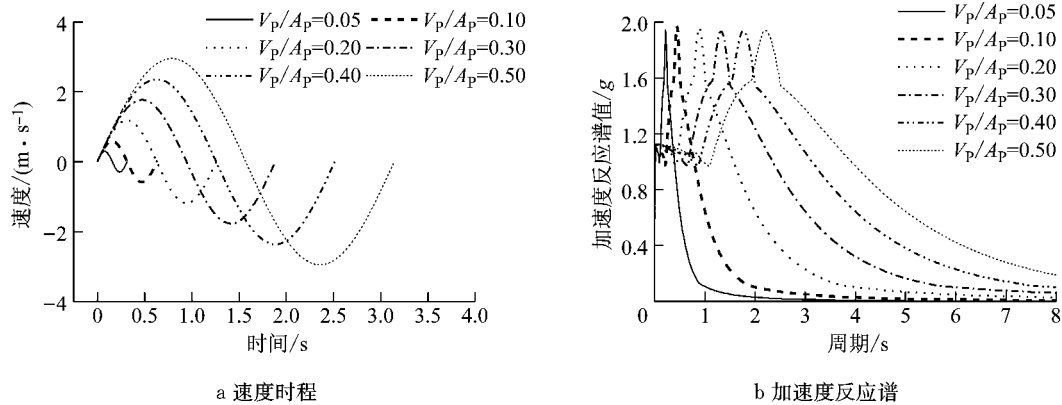


图 3 模拟的速度脉冲波

Fig.3 Simulated velocity pulses

条地震波的具体信息如表 2 所示, V_P/A_P 取值在 0.059~0.472 之间. 图 4 给出了其中 5 条地震波将加速度峰值(PGA)调整至 0.6g 后的加速度反应谱(3%的阻尼比). 由图 4 可见, 当 V_P/A_P 值较小时(如 #7、#9 波), 地震波的特征周期较小; 而当 V_P/A_P

值较大时(如 #1、#3 号地震动), 地震波的特征周期较长, 在长周期部分谱值较大. 可见, 第一组和第二组地震动加速度反应谱随 V_P/A_P 值的变化特征相似.

表 2 选择的实际地震波

Tab.2 Selected ground motions

编号	地震	站点	A_p/g	$V_p/(cm \cdot s^{-1})$	$(V_p/A_p)/s$
#1	ChiChi	TCU052	0.349	164.9	0.472
#2	ChiChi	TCU102	0.169	71.9	0.425
#3	ChiChi	TCU053	0.132	44.85	0.340
#4	ChiChi	TCU054	0.143	45.7	0.320
#5	Imperial Valley-07	EL Centro #5	0.379	90.6	0.239
#6	Northridg	Rinaldi	0.825	160	0.194
#7	Northridg	Newhall.	0.583	74.9	0.128
#8	Tabas	Tabas	0.836	97.7	0.117
#9	Imperial Valley-02	EL Centro #9	0.313	29.6	0.095
#10	Whittier Narrows	Sun Valley	0.223	13.2	0.059

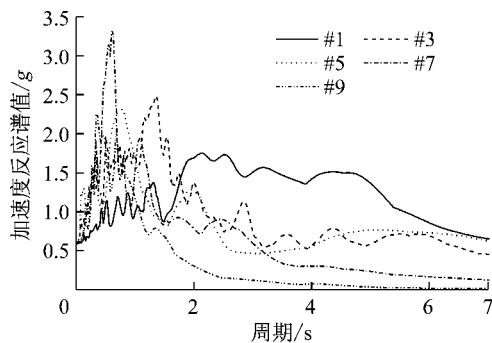


图 4 选择的 5 条典型地震动的加速度反应谱

Fig.4 Acceleration response spectrum for selected six typical ground motions

3 独塔斜拉桥地震反应特点

根据建立的基准模型(不考虑支座脱空和拉索

松弛效应的模型), 研究了独塔斜拉桥塔柱、主梁、拉索和支座等地震响应特点及其与地震动频谱特征的关系.

3.1 塔柱

图 5 给出了不同速度脉冲波输入下塔柱弯矩和剪力包络图. 图中在塔柱交叉处以下的塔柱均取单个塔柱的地震响应, 因而在塔柱交叉处塔柱截面的弯矩和剪力加倍. 图 5 结果表明, 塔柱的弯矩和剪力响应均随 V_P/A_P 值增加而增大, 特别是当 $V_P/A_P > 0.3$ s 后, 塔底弯矩增加较快, 如 $V_P/A_P = 0.4$ 时塔底弯矩约为 $V_P/A_P = 0.3$ 时的 2.3 倍. 同时, 当 $V_P/A_P > 0.3$ s 后, 塔身的弯矩和剪力也有较大的增加. 以塔高 $H = 50$ m 处截面为例, 当 $V_P/A_P = 0.2$ 时, 该截面的弯矩和剪力分别为塔底 40% 和 51%, 而当 $V_P/A_P = 0.4$ 时, 以上比例达到 81% 和 70%.

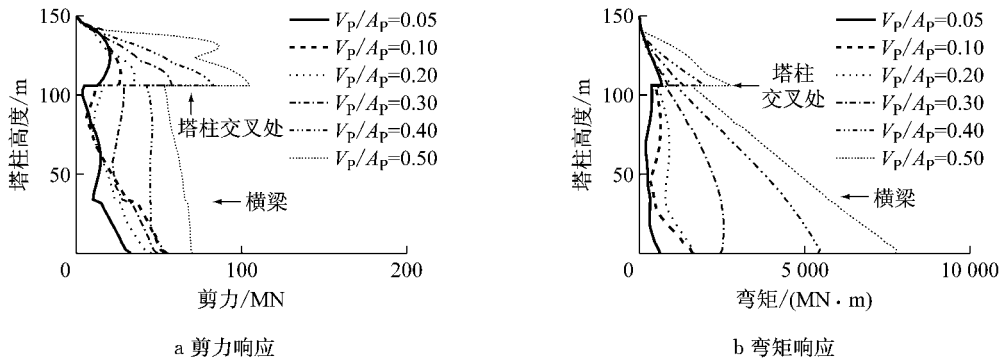


图 5 速度脉冲波输入时塔柱弯矩和剪力响应

Fig.5 Moment and shear force response of the tower under velocity pulses

图 6 给出了在 10 条实际地震动输入下塔底、塔身截面的剪力和弯矩响应,其中塔身截面以塔高 50 m 处的塔柱截面为例进行说明. 与速度脉冲波作用的结果相似,在实际地震波作用下,塔柱的弯矩和

剪力响应总体上均随 V_p/A_p 值的增大而增加. 同时,随着 V_p/A_p 值的增加,塔身剪力增加很快,接近塔底剪力,表明近断层地震作用下不仅是塔底,而且塔身截面的地震响应也需要引起重视.

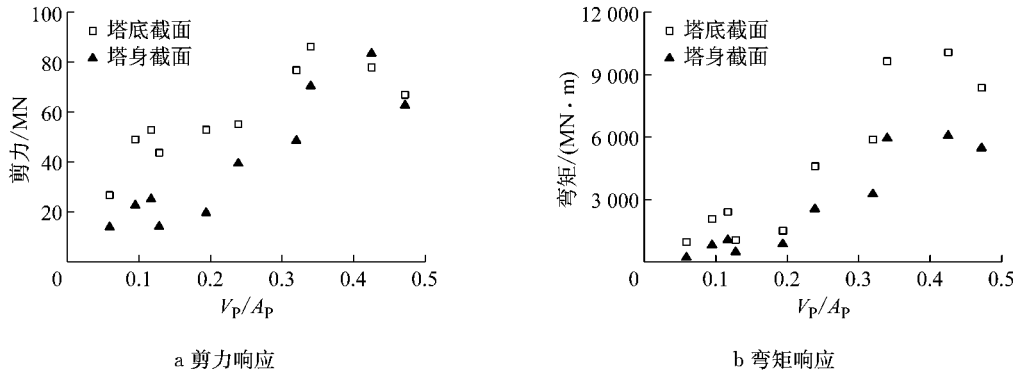


图 6 实际地震波输入时塔柱地震响应(塔身截面对应于塔高 50 m 处截面)

Fig.6 Seismic response of tower bottom under actual ground motions

3.2 主梁

图 7 给出了速度脉冲波输入下主梁绕 y 轴弯矩(以下简称为主梁弯矩)和竖向位移与 V_p/A_p 值的关系;由于对称性,这里仅给出了左跨主梁的响应.

由图 7 可以看出,随 V_p/A_p 值的增大,主梁的弯矩和位移响应均迅速增加,这是因为当 V_p/A_p 值较大时,速度脉冲波的激励周期与主梁第一阶竖弯振型的周期($T=2.81$ s)接近. 如当 $V_p/A_p=0.4$ s 时,速

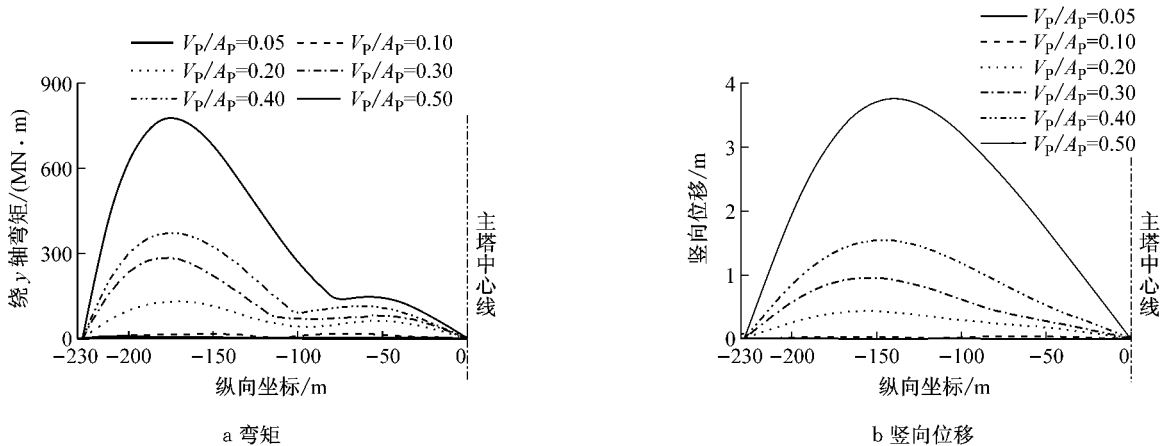


图 7 速度脉冲波输入时主梁弯矩和竖向位移

Fig.7 Moment and vertical displacement of the girder under velocity pulses

度脉冲波的周期 $T_g = 2.513\text{ s}$, 接近 2.81 s (主梁第一阶竖弯振动周期). 同时, 图 7 还表明, 主梁弯矩和竖向位移最大值均出现在距梁端约 $1/4$ 跨附近. 可见, 对于背景工程, 在近断层地震作用下, 主梁地震响应研究时应重点关注距梁端 $1/4$ 跨的位置.

图 8 给出了在实际波输入下主梁弯矩、主梁纵向位移和竖向位移与实际地震动频谱特性的关系, 其中主梁弯矩和竖向位移均取距梁端 $1/4$ 跨处的响应, 主梁纵向位移取梁端位移, 图 8a 也给出了主梁恒载弯矩最大值. 结果表明, 主梁弯矩、纵向位移和竖向位移均随 V_p/A_p 值的增大而增加. 当 $V_p/A_p < 0.2$ 时, 主梁的地震响应较小. 其中梁体弯矩响应在 $300\text{ MN}\cdot\text{m}$ 以内, 与恒载弯矩相差不大; 梁体纵向

位移和竖向位移在 1 m 以内. 当 $V_p/A_p > 0.2$ 时, 由于地震波引起主梁第一阶竖弯阵型的共振, 主梁的弯矩和竖向位移响应均大幅度增加. 其中, 主梁弯矩最大达到 $1\,200\text{ MN}\cdot\text{m}$, 约为恒载弯矩的 10 倍左右, 主梁竖向最大位移约达到 5 m . 同时, 当 $V_p/A_p > 0.2$ 时, 由图 4 可知, 结构纵飘周期对应的地震波谱值增加, 梁体纵向位移也较大; 当 $V_p/A_p \approx 0.4$ 时, 梁体纵向位移达到 5 m . 如此大的梁体位移已超出滑动支座及伸缩缝的容许位移, 在实际工程中需要采取措施来对梁体位移进行控制, 如在塔梁间设置粘滞阻尼器、减震支座^[8]等. 可见, 当 $V_p/A_p > 0.2$, 地震对主梁地震响应的影响较为明显, 这与 Loh 等^[16]得到的结论相吻合.

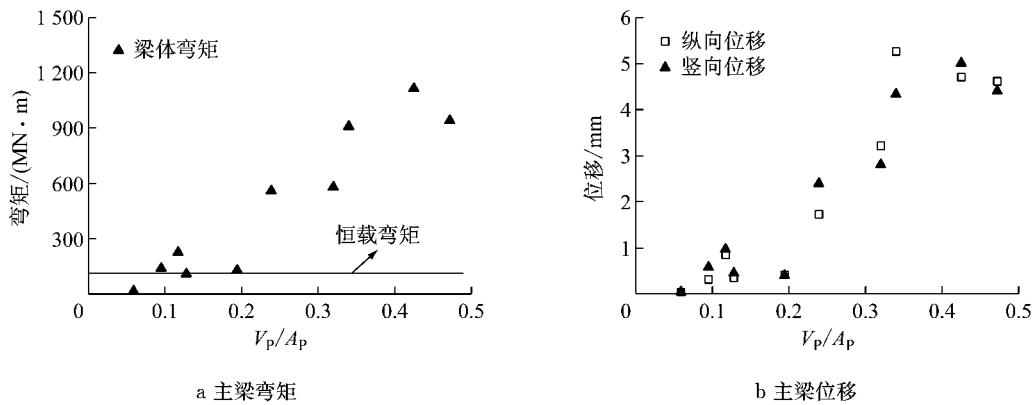


图 8 实际地震波输入时距梁端 $1/4$ 跨位置地震响应

Fig.8 Seismic response under actual ground motions of the girder one fourth from girder end

3.3 拉索

图 9 给出了速度脉冲波输入下拉索地震索力随 V_p/A_p 值变化的情况. 由图 9 可以看出: (1) 拉索地震索力随 V_p/A_p 值的增加而变大, 这是因为 V_p/A_p 值较大时, 速度脉冲波的激励周期与主梁竖弯振型的周期接近, 导致索力有较大增加; (2) 当 V_p/A_p 大于 0.3 后, 由于梁体竖弯振动的影响, 梁端拉索 (C15—C17) 的地震索力急剧增加, 明显大于其余拉索地

震索力的变化; (3) 在 V_p/A_p 值较大时, 中间部分拉索和端锚索 (C17) 的地震索力均超过了成桥索力, 说明这些拉索都可能出现松弛现象.

图 10 给出了实际波输入下 C9 和 C17 拉索压力随 V_p/A_p 值变化情况. C9 索和 C17 索地震索力均随 V_p/A_p 的增大而增加; 同时, 当 $V_p/A_p > 0.2\text{ s}$ 时, C9 和 C17 索均出现了地震索力大于拉索成桥索力的现象, 表明拉索产生了松弛现象. 相对而言, C17

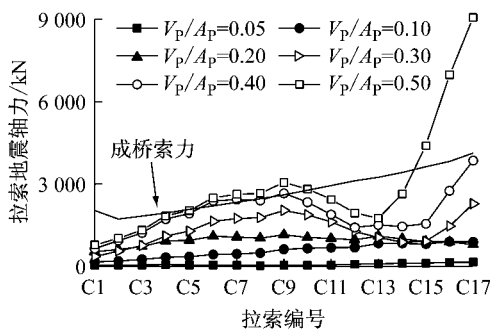


图 9 速度脉冲波输入时拉索地震索力

Fig.9 Cable axial seismic force under velocity pulses

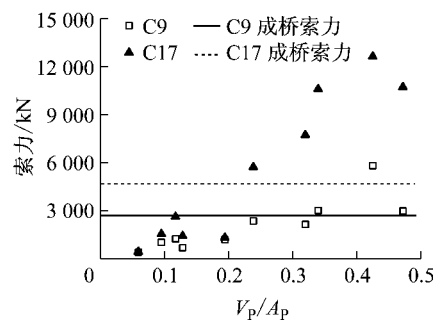


图 10 实际地震波输入时部分拉索压力响应

Fig.10 Some cable axial force under actual ground motions

索在 $V_p/A_p > 0.2$ s 后地震索力增加幅度远大于 C9 索,且更容易出现拉索松弛现象.

3.4 支座

图 11 给出了速度脉冲波和实际地震波输入下过渡墩处支座竖向反力与 V_p/A_p 值的关系. 两种地震波输入下,支座地震反力均呈现随 V_p/A_p 值增加而增大的趋势,且均出现了支座拉力超过支座成桥压力的情况,表明如果没有采取抗拉措施,在过渡墩处梁体可能会与支座脱离,产生支座脱空现象. 另外,当 $V_p/A_p < 0.2$ s,支座地震反力也可能大于支座成桥压力,表明在远场地震作用下,支座也可能出现脱空现象.

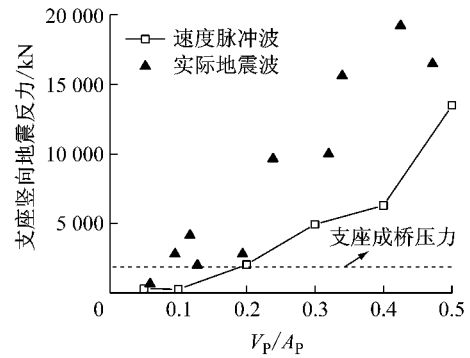


图 11 过渡墩处支座竖向地震反力变化
Fig.11 Vertical seismic reactions of bearings at transition piers

4 支座脱空和拉索松弛效应

基准模型没有考虑支座脱空和拉索松弛效应,但计算结果表明,在模拟的速度脉冲和实际地震作用下,独塔斜拉桥均出现了支座脱空和拉索松弛

的现象. 为了研究支座脱空和拉索松弛对独塔斜拉桥结构抗震性能的影响,在基准模型的基础上,根据式(1)和式(2)对支座脱空和拉索松弛进行模拟,采用非线性时程分析方法,研究了支座脱空和拉索松弛效应. 图 12 为 10 条实际地震动输入下考虑和不考虑支座脱空、拉索松弛塔柱、梁体、拉索与支座的

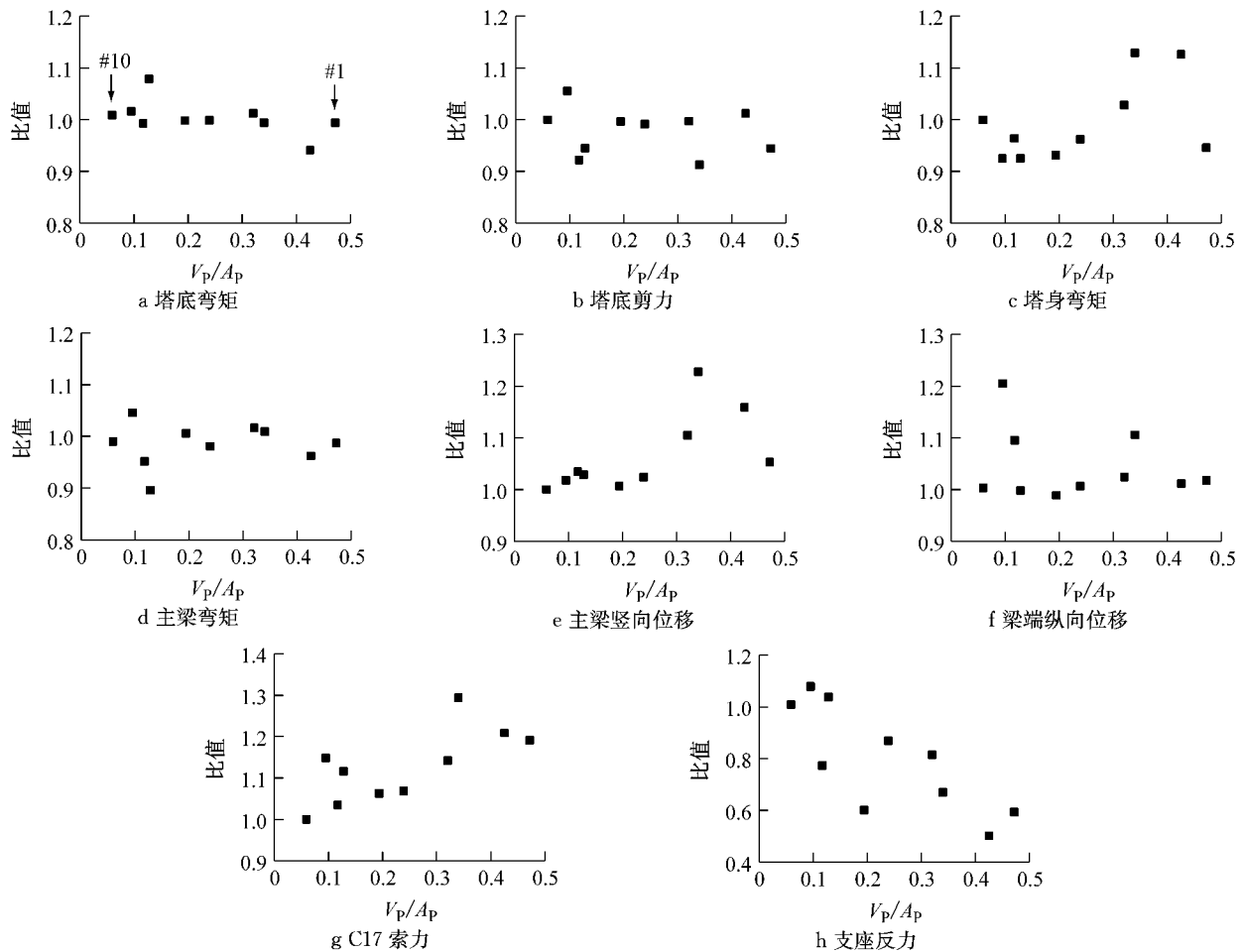


图 12 实际地震波输入时考虑和不考虑支座脱空、拉索松弛结构地震响应幅值比
Fig.12 Peak value ratios of structural response with and without cable relaxation, end span uplift under actual ground motions

地震响应幅值比;其中塔身弯矩取塔高 50 m 处的响应,主梁弯矩、主梁竖向位移均取距梁端 1/4 跨位置的地震响应。

由图 12a、12b、12c 可知,塔柱的地震响应受支座脱空和拉索松弛的影响较小,与不考虑支座脱空和拉索松弛的结果相差在 20% 以内。图 12d、12e、12f 表明,主梁弯矩受支座脱空和拉索松弛的影响较小,但主梁竖向位移、梁端纵向位移受支座脱空和拉索松弛的影响较大,如 #3 波作用下主梁竖向位移增加了 23%, #9 波作用下梁端纵向位移增加了 20%。图 12g 表明,C17 索力在考虑支座脱空和拉索松弛后响应普遍增加较多, #3 波作用下 C17 索力增加了 30%。图 12h 表明在 V_P/A_P 较大时,支座竖向反力有所减小,如在 #2 波作用下支座反力减小

了 50%。

上述分析表明,不考虑支座脱空和拉索松弛可能会低估主梁位移和拉索索力响应。

图 13 给出了 #3 波输入下考虑和不考虑支座脱空和拉索松弛独塔斜拉桥地震响应时程曲线。可见,C9 拉索在 55 s 附近出现了拉索松弛现象,C17 索在 39 s 后出现了多次拉索松弛现象,过渡墩支座从 37 s 开始出现了多次且持时较长的支座脱空现象。总体来看,在 #3 波输入下,当出现支座脱空和拉索松弛后,除了支座反力响应有所减小外,其余响应均有一定程度的增加,其中塔底弯矩、梁体弯矩、梁端位移和 C9 索力等响应时程曲线变化较小,而 C17 索和支座响应时程曲线变化较为明显。

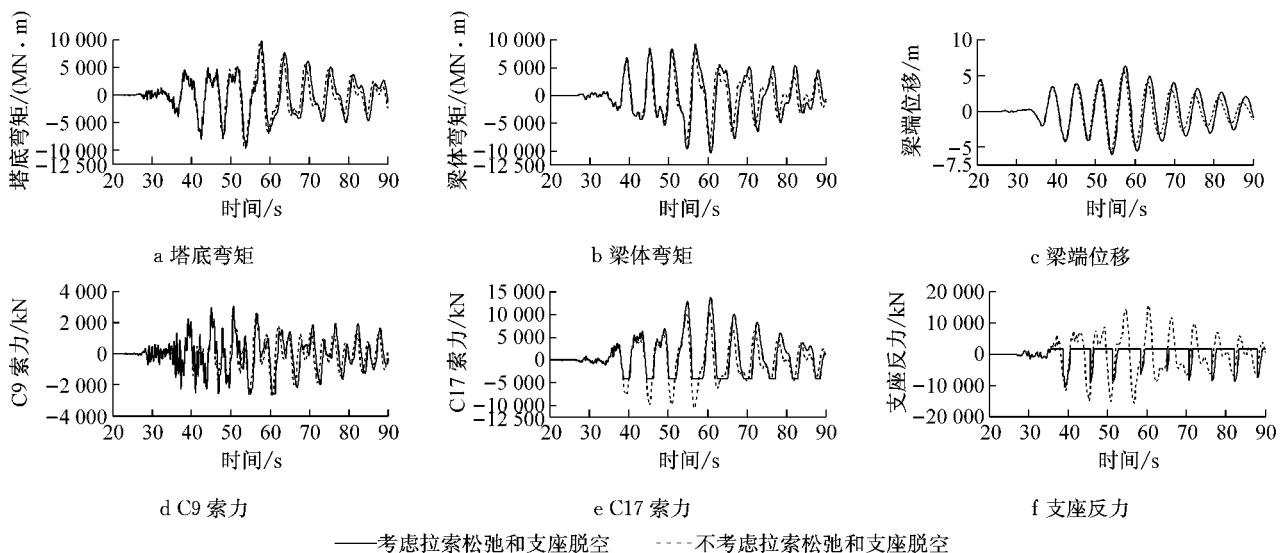


图 13 #3 波输入时独塔斜拉桥部分构件地震响应时程曲线(梁体弯矩取距梁端 1/4 跨梁体截面响应)

Fig. 13 Time history of some seismic responses of single tower cable-stayed bridges under #3 ground motion

5 总结

本文针对独塔斜拉桥,研究了不同频谱特性地震输入下桥塔、梁体、拉索以及支座的地震响应特点,并对研究中出现的支座脱空和拉索松弛现象进行了分析,结果表明:

(1) 随着 V_P/A_P 值增大,塔柱、梁体、拉索和支座的响应均呈增加的趋势。特别是当 $V_P/A_P > 0.2$ s 时,脉冲波的周期与主梁第一阶竖弯振型接近,主梁的弯矩和位移响应均大幅度增加;

(2) 在部分模拟的速度脉冲和实际地震动作用下,独塔斜拉桥出现了支座脱空和拉索松弛的现象。当 $V_P/A_P > 0.2$ 时端锚索和中间拉索可能产生松弛

现象,而当 $V_P/A_P > 0.2$ 和 $V_P/A_P < 0.2$ 时支座均可能出现脱空现象。

(3) 与不考虑支座脱空和拉索松弛效应相比,考虑支座脱空和拉索松弛后,主梁位移、拉索索力和支座竖向反力等时程响应改变较大,误差最大分别达到 23%、30%和 50%,在设计时应特别注意。

参考文献:

- [1] 李晓莉. 独塔斜拉桥的设计理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
LI Xiaoli. Study for design theories of single pylon cable-stayed bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [2] 黄小国, 李建中, 郭磊. 地震作用下独塔斜拉桥合理约束体系[J]. 结构工程师, 2008, 24(6): 29.
HUANG Xiaoguo, LI Jianzhong, GUO Lei. Appropriate

- constraint systems for simple-tower cable-stayed bridge under earthquake[J]. *Structural Engineers*, 2008, 24(6): 29.
- [3] CHANG K C, MO Y L, CHEN C C, *et al.* Lessons learned from the damaged Chi-Lu cable-stayed bridge[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9(4): 343.
- [4] CHADWELL C B. Seismic response of single tower cable-stayed bridges [D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2003.
- [5] 黄学漾, 宗周红, 夏坚, 等. 强震作用下独塔斜拉桥模型的非线性动力响应分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(2): 354.
- HUANG Xueyang, ZONG Zhouhong, XIA Jian, *et al.* Nonlinear dynamic response analysis of cable-stayed bridge with single tower under strong earthquake excitations [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(2): 354.
- [6] JAMGOD R S, KELLY J M. Base isolation for near-fault motions[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, 30(5): 691.
- [7] 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.
- LI Yong, YAN Weiming, CHEN Yanjiang, *et al.* Seismic response analysis and control of long-span cable-stayed bridges under near-fault earthquakes [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(5): 479.
- [8] WESOLOWSKY M J, WILSON J C. Seismic isolation of cable-stayed bridges for near-field ground motions[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2003, 32(13): 2107.
- [9] 蔡茂江, 徐艳, 李建中. 近场地震作用下斜拉桥黏滞阻尼器参数分析[J]. *上海应用技术学院学报(自然科学版)*, 2013, 13(1): 17.
- CAI Maojiang, XU Yang, LI Jianzhong. Parametric study on the viscous dampers used for a cable-stayed bridge considering the near-fault earthquakes[J]. *Journal of Shanghai Institute of Technology(Natural Science)*, 2013, 13(1): 17
- [10] 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(2): 41.
- XU Yang, HUANG Yonghu, LI Jianzhong. 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(2): 41.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-01—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- The Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidelines for seismic design of highway bridges: JTG/T B02-01—2008[S]. Beijing: China Communication Press, 2008.
- [12] MIDAS I T. MIDAS/CIVIL user's manual [M]. Beijing: MIDAS Information Technology Co. Ltd., 2010.
- [13] FLEMING J F, EGESLI E A. Dynamic behavior of a cable-stayed bridge [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1980, 8(1): 1.
- [14] DICLELI M, BRUNEAU M. An energy approach to sliding of single-span simply supported slab-on-girder steel highway bridges with damaged bearings [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1995, 24(3): 395.
- [15] 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.
- [16] LOH C H, WAN S, LIAO W I. Effects of hysteretic model on seismic demands: consideration of near-fault ground motions [J]. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2002, 11(3): 155.