

近、远场地震动作用下斜拉桥动力响应分析

吴文鸿¹, 陈俊能¹, 吴金建¹, 李文勃²

[1. 泉州市路桥发展集团有限公司, 福建 泉州 362011; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为研究近、远场不同类型地震动对斜拉桥动力响应的影响规律, 以东南沿海某斜拉桥为研究对象, 基于SAP2000软件建立了斜拉桥全桥非线性有限元模型, 计算分析了近场脉冲、近场非脉冲和远场地震动三种不同类型地震下斜拉桥的动力响应。研究表明: 当地震动强度为 $0.4g$ 时, 近场非脉冲地震动作用下斜拉桥墩底弯矩的响应值要大于远场地震动以及近场脉冲地震动下的响应; 随着地震动强度的增加, 脉冲效应对斜拉桥的动力响应的影响越大; 近场脉冲型地震动对斜拉桥位移响应的影响要大于内力响应, 且对塔顶位移的影响最大。研究成果对于近场区斜拉桥的抗震设计具有指导意义。

关键词: 近场脉冲型地震动; 远场地震; 斜拉桥; 动力响应

中图分类号: U488.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0120-04

Analysis on Dynamic Response Cable-stayed Bridges under Action of Near-field and Far-field Ground Motions

WU Wenhong¹, CHEN Junneng¹, WU Jinjian¹, LI Wenbo²

[1. Quanzhou City Road and Bridge Development Group Co., Ltd., Quanzhou 352011, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In order to study the influence of different near-field and far-field ground motions on the dynamic response of cable-stayed bridge, taking a cable-stayed bridge along the southeast coast as the research object, and based on SAP2000 software, a nonlinear finite element model of the whole bridge is established. The dynamic responses of cable-stayed bridge under three different ground motions of near-field pulse, near-field non-pulse and far-field ground motions are calculated and analyzed. The research result shows that when the local seismic intensity is $0.4g$, the response value of pier bottom bending moment of the cable-stayed bridge under the action of near-field non-pulse ground motion is larger than the responses under the far-field and near-field pulse ground motions. As the intensity of the ground motion increases, the influence of pulse effects on the dynamic response of the cable-stayed bridge is greater. The effect of near-field pulse ground motion on the displacement response of cable-stayed bridge is larger than the internal force response, and the effect on the displacement of pylon top is the largest. The research results have the guiding significance for the seismic design of cable-stayed bridges in the near-field area.

Keywords: near-field pulse ground motion; far-field ground motion; cable-stayed bridge; dynamic response

0 引言

在现代交通工程建设中, 桥梁作为连接不同地域、促进经济交流和社会发展的基础设施, 其重要性不言而喻。斜拉桥因其梁体尺寸较小、跨越能力大以及良好的抗风稳定性等优点, 越发受到人们的青睐^[1]。由于我国地处板块交界地带, 许多桥梁需要建在近断层区域, 而斜拉桥具有高柔性、长周期等特

点, 在脉冲地震作用下可能产生较大位移, 使桥梁结构发生严重破坏甚至倒塌^[2-3]。近年来, 通过记录多次强震作用下建筑物的破坏, 发现多数桥梁, 特别是长周期大跨斜拉桥破坏的主要原因是近断层脉冲效应造成的^[4-5]。在20世纪90年代中国台湾的Chi-Chi地震和2008年中国汶川地震中, 桥梁结构中损坏最为严重的区域主要位于近断层附近, 这些损坏的典型表现就是产生永久地表位移、落梁、桥墩破坏乃至全桥倒塌^[6-7]。然而大多数国内外现行规范没有考虑地震动的脉冲效应, 因此有必要全面评估斜拉桥在脉冲地震下的抗震性能。

针对这一问题, 国内外学者已展开相关研究。

收稿日期: 2024-11-18

作者简介: 吴文鸿(1973—), 男, 学士, 高级工程师, 从事路桥施工管理工作。

通信作者: 李文勃(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 从事桥梁结构设计研究工作。电子邮箱: 3110798588@qq.com

Ismail 等^[8]针对斜拉桥研究了 RNC 隔震器在近断层下的抗震性能,证明了 RNC 隔震器在保护斜拉桥免受近断层地震影响方面的有效性。张凡等^[9]研究了脉冲特性和桩-土相互作用 (Soil-Structure Interaction, SSI) 对斜拉桥动力响应的影响,发现考虑桩-土相互作用会延长结构周期,改变振型次序,增大主塔位移响应并削弱其内力,而脉冲效应会增强 SSI 效应的影响。Karaca 等^[10]开展了大跨斜拉桥在近/远场地震动作用下的动力响应,发现近场脉冲地震动会显著提高斜拉桥的动力响应。夏春旭等^[11]进一步研究多脉冲型地震动对斜拉桥响应的影响,通过 LS-DYNA 程序建立全桥有限元模型,发现多脉冲型地震动作用下,桥塔和桥墩的纵向位移及横向弯矩增大显著,而斜拉索索力变化不大。马跃腾等^[12]研究了近、远场地震动对有、无辅助墩斜拉桥响应的影响,发现近场地震动下的斜拉桥响应显著大于远场地震动,且设置辅助墩可减小斜拉桥在近场地震动下的内力响应。

上述研究表明脉冲效应可显著放大斜拉桥的动力响应,然而大多研究仅分析近场脉冲地震动与远场地震动之间的响应差距,文献[13-15]均指出近场非脉冲地震动与远场地震动对结构响应的影响并不一致,目前鲜有研究关注近场非脉冲地震对斜拉桥的影响,针对上述不足,本文以东南沿海某一斜拉桥为研究对象,基于 SAP2000 有限元程序建立斜拉桥全桥模型,基于 PEER 数据库选取了 3 类不同特性的地震动,并开展了近场脉冲地震、近场非脉冲地震、远场地震动下的动力响应分析,明晰了不同类型地震动对斜拉桥响应规律的影响。

1 数值模拟

1.1 桥梁工程背景

独塔双索面分体式钢混组合梁斜拉桥全长为 336 m,跨径布置为 168 m+168 m(见图 1)。该桥采用全漂浮体系,主梁断面采用分体式双边主梁,两幅纵梁中间通过箱型钢横梁连接,全断面宽度为 57.9 m,梁高 3.9 m。索塔采用花瓶型塔身,塔高 133.5 m。斜拉索为空间扭转式双索面布局,斜拉索索距为 10.5 m,单侧布置 14 对拉索,共计 56 根。斜拉桥抗震设防烈度为 7 度,Ⅱ类场地条件。

1.2 非线性全桥模型的建立

为了精确模拟斜拉桥在地震作用下的响应,采用有限元软件 SAP2000 建立了该斜拉桥的全桥模型

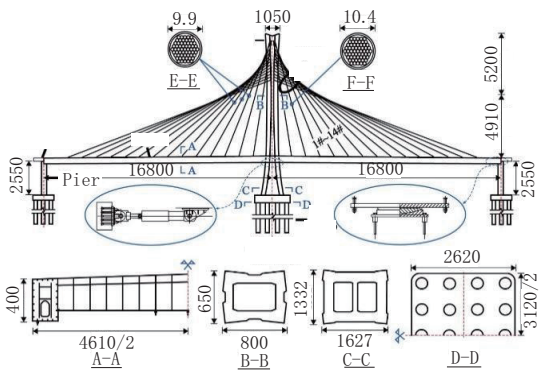


图 1 斜拉桥示意图(单位:cm)

(见图 2)。主梁采用双主梁模型进行模拟,该模型将桥面系的自重等质量按照一定比例分配到两根主梁上,同时考虑横梁对主梁的支撑作用,使模型更加接近实际受力情况。利用空间梁单元精确模拟主梁、桥塔及桥墩。斜拉桥拉索采用桁架单元模拟,并基于 Ernst 公式^[16]以考虑垂度效应的影响。承台与承台中心、承台与桩基顶部中心之间采用主从连接方式。在加载方面,第一阶段恒载以线质量形式作用于梁上,第二阶段则同样以线质量形式施加于梁顶。此外,在模型中通过对斜拉桥和桥塔单元施加 $P-\Delta$ 力来考虑几何非线性,桥塔 $P-\Delta$ 力取值为恒载作用下桥塔轴力,斜拉桥 $P-\Delta$ 力取值为成桥索力。

采用空间梁单元建立全桩模型,将桩每 2.5 m 划分为一个单元,在各节点处用点弹簧来模拟桩-土相互作用,其只有在纵向和横向具有刚度,弹簧的初始刚度值由“m 法”确定,每根桩桩底约束全部自由度。在进行时程响应分析时,结构阻尼采用 Rayleigh 模型^[17],阻尼比取 3%。

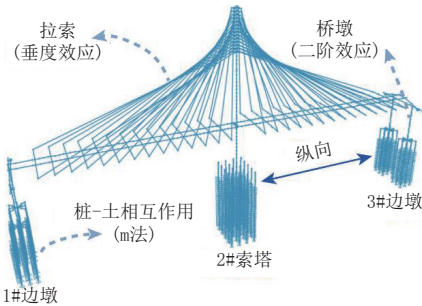


图 2 有限元模型

2 地震动选取

目前对于近场脉冲地震动尚未有统一的选取原则,大多学者以断层距在 20~40 km 内为基础条件选取近场脉冲地震动^[18]。本文参考相关文献的地震动选取原则^[19-20]。将断层距在 30 km 以内作为初筛条件,基于 PEER 数据库选取近场脉冲地震、近场非脉

冲地震和远场地震动各3条。图3显示了3种不同类型地震动的加速度时程曲线及其反应谱,从图中可以看出,近场脉冲地震动的加速度反应谱明显有较宽的平台期,意味着其对长周期结构会产生更加显著的影响。

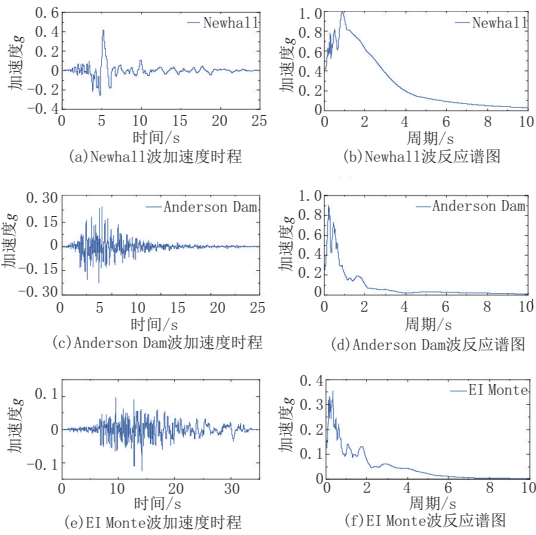


图3 地震动加速度时程及反应谱

表1列出了所选地震动的基本信息,地震动选取原则为:(1)震级大于6.5级;(2)土层平均剪切波速 v_{se} 取值为250~500 m/s;(3)断层距在30 km以内。

表1 地震动基本信息

地震事件	类型	震级	PGA g	PGV/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	台站
Northridge-01	FD	6.69	0.419	118.178	Newhall-W Pico
Loma Prieta	FD	6.93	0.246	21.78	Anderson Dam
Northridge-01	FD	6.69	0.126	8.908	EI Monte-Fairview Av
Loma Prieta	NP	6.93	0.246	21.788	Anderson Dam
Landers	NP	7.28	0.274	27.021	Joshua Tree
Northridge-01	NP	6.69	0.345	41.115	Arleta-Nordhoff Fire Sta
Northridge-01	FF	6.69	0.126	8.908	EI Monte-Fairview Av
Kocaeli	FF	7.51	0.177	16.906	Cekmece
Manjil	FF	7.37	0.132	20.713	Abhar

注:FD表示近场脉冲型地震动;NP表示近场非脉冲型地震动;FF表示远场地震动。

3 动力响应分析

将三种类型地震动的加速度峰值调幅至0.2g、0.4g、0.6g 3种强度等级,并将地震动纵向输入至有限元模型^[21],从而分析斜拉桥在不同类型地震动下的最大内力、位移响应。

3.1 沿塔高的动力响应

图4为3种地震动在不同强度下对沿主塔塔高位移响应的影响。由图4可得,地震动类型对桥塔不同位置位移响应的影响规律不同。桥塔曲直交界

处在近断层脉冲型地震动作用下响应最大,而近场非脉冲型与远场地震动作用下的响应相差无几,相较于远场地震动下的响应,近断层脉冲型地震下的响应增幅为44%,且随着加速度峰值的增加,这一增幅从44%递增至122%,说明加速度峰值是影响脉冲效应的重要因素,加速度峰值越大,脉冲效应对结构的激励越强。此外,在上塔柱顶,近断层非脉冲型地震动下的响应开始明显大于远场地震动下的响应,这表明了在近断层非脉冲型地震动与远场地震动的特性并不一致,然而之前大多研究并未区分这两种地震动的区别。从总体上看,3种地震动下的响应均随着塔高的增高,位移响应也越大,当达到塔顶时,位移也达到峰值,这符合斜拉桥纵飘的振型特征。上述研究表明,斜拉桥结构设计时有必要在考虑近断层地震动的同时考虑加速度峰值联合作用的影响。此外,在进行脉冲型地震动研究的时候应该区别远场地震动和近断层非脉冲型地震动,应根据具体问题开展有针对性的研究。

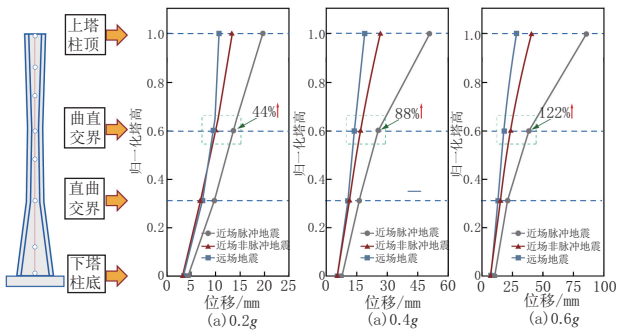


图4 沿塔高方向主塔位移响应包络线

3.2 位移响应

图5显示了3种地震动在不同强度下的塔顶、墩顶位移。定义位移放大系数 R =其他地震动下的响应/远场地震动下的响应,从图5(a)中可以看出,墩顶位移与塔顶位移在不同类型地震动下的响应规律较为一致,均是近断层脉冲型地震动下的响应大于另外两种地震下的响应。塔顶位移、墩顶位移在近场脉冲地震下的响应对比远场地震动下响应的增幅分别为83%和28%,可以明显看出塔顶位移对脉冲效应的敏感性要远大于墩顶位移。通过对比不同峰值加速度下的数值结果可以得知,加速度峰值加强了脉冲效应对斜拉桥的激励,近断层脉冲型地震动下的塔顶位移响应在0.2g、0.4g、0.6g的增幅分别为83%、168%以及200%。此外,近场非脉冲型地震动在0.2g时对墩顶位移的响应与远场地震动下的几乎一致,然而随着强度的增加,近场非脉冲地震下的动力

响应逐渐大于远场地震。上述研究表明,地震动强度和地震动类型对不同关键构件的增幅效果不同。

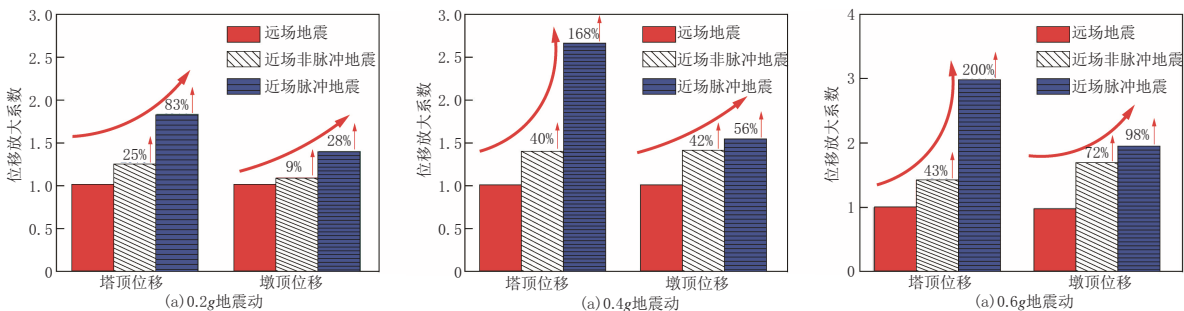


图5 不同地震动类型对塔顶、墩顶位移的影响

3.3 内力响应

图6显示了三种地震动在不同强度下的塔底、墩底弯矩。定义弯矩放大系数 R =其他地震动下的响应/远场地震动下的响应,从图6(a)中可以看出,脉冲效应对弯矩响应的影响要小于位移响应,并且脉冲地震对塔底、墩底弯矩动力响应的影响几乎一致。

对比不同强度作用下的响应,发现当强度为0.4g和0.6g时,近场非脉冲地震下的墩底弯矩甚至大于脉冲地震下的动力响应。其数值现象与位移响应显著不同。综上所述,弯矩响应对脉冲型地震动的敏感性并不高,此外,当地震动强度较大时,要注意近场非脉冲地震对斜拉桥结构动力响应产生的影响。

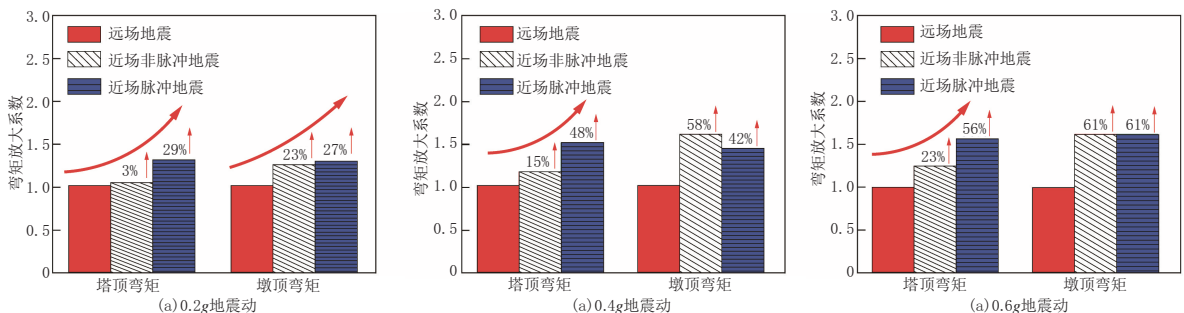


图6 不同地震动类型对塔底、墩底弯矩的影响

4 结 语

本文以一独塔斜拉桥为研究对象,探究了近场脉冲、近场非脉冲和远场地震在不同强度下对斜拉桥结构地震响应的影响,得到以下结论。

(1)3种地震动下的位移响应随着塔高高度的增加而增大,塔顶是位移响应的最大值处,下塔柱底和直曲交界处3种地震动的响应差异不明显。

(2)脉冲效应更容易激发斜拉桥的塔顶位移响应,而弯矩响应对于脉冲特性并不是很敏感。

(3)当地震动强度为0.4g时,近断层非脉冲型地震动对斜拉桥墩底弯矩的响应值要大于远场地震动以及近断层脉冲型地震动下的响应。

对于斜拉桥结构,地震动类型和地震动强度对其具有显著的影响,在进行斜拉桥抗震设计时,应充分考虑不同地震动对其的影响。本文研究成果可为相似结构抗震设计提供指导。

参考文献:

[1] 张俊鑫.近断层脉冲型地震作用下考虑桩土作用的斜拉桥地震响

应分析[D].合肥:安徽建筑大学,2024.
[2] 张新军,孙海凌.超大跨度斜拉桥空气静力和动力稳定性研究[J].中国工程科学,2014(3):52-60;65.
[3] Ghaffarzadeh H..A.classification method for pulse-like ground motions based on S-transform[J].Natural Hazards, 2016(1): 335-350.
[4] Yi J.Modeling and analysis of cable vibrations in cable-stayed bridges under near-fault ground motions[J].Engineering Structures, 2023; 277.
[5] Yi J, Yu D E.Longitudinal damage of cable-stayed bridges subjected to near-fault ground motion pulses[J]. Advances in Bridge Engineering, 2021, 2(1).
[6] Chu-Chieh Jay Lin, Hsiao-Hui Hung, Kuang-Yen Liu, Juin-Fu Chai. Reconnaissance Observation on Bridge Damage Caused by the 2008 Wenchuan (China) Earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2010 (4): 1057-1083.
[7] Kazuhiko KAWASHIMA.DAMAGE OF BRIDGES RESULTING FROM FAULT RUPTURE IN THE 1999 KOCAELI AND DUZCE, TURKEY EARTHQUAKES AND THE 1999 CHI-CHI. TAIWAN EARTHQUAKE[STRUCTURAL ENGINEERING EARTHQUAKE ENGINEERING[Z].2002.
[8] Mohammed Ismail, Joan R. Casas, Jose Rodellar. Near-fault isolation of cable-stayed bridges using RNC isolator[J]. Engineering Structures, 2013: 327-342.
[9] 张凡,李帅,颜晓伟,等.近断层脉冲型地震动作用下大跨斜拉桥地震响应分析[J].振动与冲击,2017(21):170-179;191.

(下转第128页)