

近断层地震动关键特性对大跨径网状拱桥地震响应的影响研究

陈曦

(安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要: 近场地震断层破裂的方向性效应和滑冲效应会造成在地震动记录和地震动分布场中出现一些典型的特征, 为研究这些特殊效应对大跨径网状拱桥地震响应的影响, 通过选取具有两种效应的实测近场地震动记录和不具有该效应的远场地震动作为输入地震动, 通过将调幅, 对一座大跨径网状拱桥进行非线性动力时程分析, 对比研究发现具有破裂方向性效应和滑冲效应的地震波会显著增大网状拱桥的地震响应, 其中破裂方向性效应对大跨径网状拱桥的内力响应影响最大, 滑冲效应则对结构位移影响更显著, 但均明显大于具有相同地震动强度的远场地震动波。

关键词: 近断层地震动, 破裂方向性效应, 滑冲效应, 大跨径网状拱桥, 非线性时程分析

中图分类号: U448.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 08—0158—03

1 引言

地球物理学和地震学研究表明, 近断层地震具有两种特殊的特征效应, 分别为破裂方向性效应 (Forward-directivity effect) 和滑冲效应 (Fling-step effect)。地震断层的破裂一般是从断层上的某一点或者某一区域开始^[1], 而后逐渐向外扩展, 因而断层的破裂扩展具有一定的传播过程, 当断层沿着某一优势方向以接近于震源区地壳介质剪切波速的速度破裂传播时, 在地震观测数据中会出现明显的方向性特征^[2-3]。速度脉冲型地震动分为由破裂传播的多普勒效应引起的地震动向前方向性速度脉冲和由断层的滑冲效应引起的地震动滑冲效应速度脉冲两类, 破裂方向性效应速度脉冲主要发生于垂直于断层面的方向, 而滑冲效应速度脉冲发生在断层的滑动方向^[4]。滑冲效应一般使地震动速度时程中出现单向脉冲, 而向前方向效应一般表现为双向或多向速度脉冲。

这两种产生机制的速度脉冲效应会显著影响桥梁的地震响应规律, 因此, 本文将基于非线性动力时程分析, 深入研究具备破裂方向性效应和滑冲效应的近断层地震动对大跨径网状拱桥地震响应规律的影响, 并与远场地震动进行对比分析。

2 破裂方向性效应与滑冲效应

2.1 近断层破裂的方向性效应

破裂的方向性效应与断层的破裂方向和速度、断层面的滑动方向和位错的分布、断层的倾角、观测点的位置等因素有关^[5]。当断层的倾角很大时, 方向性效应主要表现在垂直于断层走向的方向; 当断层的倾角很小时,

方向性效应则主要表现在地震动的垂直分量上。方向性效应可根据断层破裂方向与场地的关系分为前方向性效应、后方向性效应和中性方向性效应^[6]。因为一般认为地震动受前方向性效应影响时将加重工程结构的破坏, 且是脉冲型地震动产生的主要原因之一, 通常所提及的方向性效应均指前方向性效应。

2.2 滑冲效应

滑冲效应是指断层上下两盘由于相对运动使得地震动的速度时程中出现单方向半脉冲进而导致地面出现阶跃式不可恢复位移的特性^[7], 一般激起结构体系的基本振型响应。一般认为滑冲效应对长周期结构的影响大于向前方向性效应。

3 工程案例研究

3.1 工程概况

本文选取主跨为 190m 的下承式大跨径钢箱提篮网状拱桥作为研究对象 (以下简称算例桥梁) 主桥桥型布置见图 1 所示, 研究近场地震的破裂方向性效应与滑冲效应对大跨径网状拱桥地震响应规律的影响。

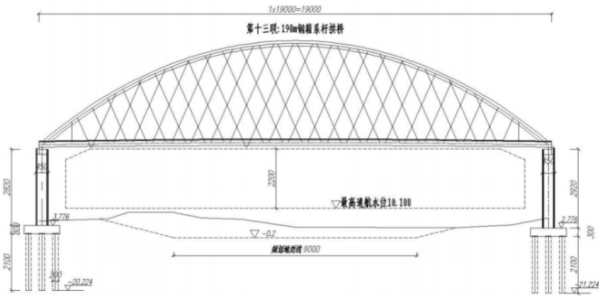


图 1 算例桥梁的桥型布置图

3.2 非线性抗震有限元模型

采用通用结构有限元分析软件 SAP2000 进行算例桥梁地震响应分析。在建立算例桥梁抗震有限元模型时,以顺桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖向为 Z 轴。其中,主梁、主拱圈、桥墩均离散为空间梁单元;主梁采用单梁式力学模型;拱桥吊杆采用空间桁架单元,考虑垂度效应和二阶效应;支座采用连接单元模拟,并采用双线性本构模型。承台模拟为质点,并且承台和桩基顶部节点采用主从连接。桩基础采用一个 6×6 集中土弹簧模型模拟土—桩基—桥梁结构的动力共同作用,该桥抗震有限元模型见图 2。结构阻尼比取 0.03。

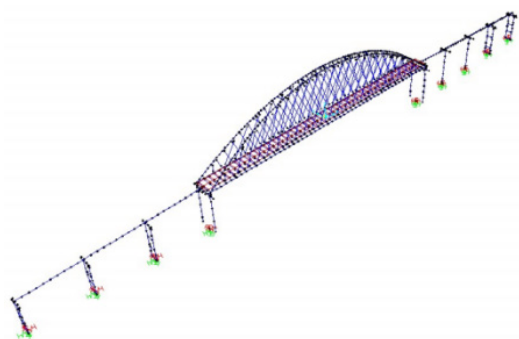
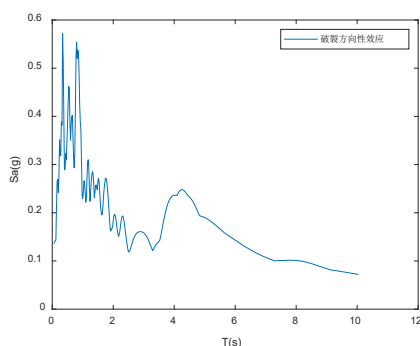


图 2 算例桥梁抗震有限元分析模型

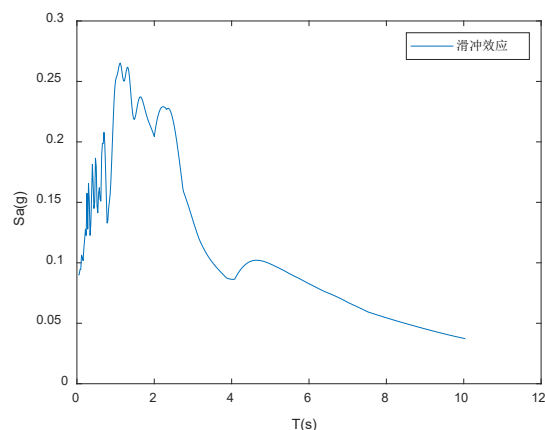
首先,采用 Ritz 向量法分析了桥梁结构的前 600 阶振型,其中前 3 阶自振周期与振型特征分别为:第一阶:1.235 s,拱肋一阶对称横弯;第二阶:0.798 s,主梁—拱肋一阶纵飘;第三阶:0.693 s,左侧引桥对称纵飘。

3.3 地震波输入

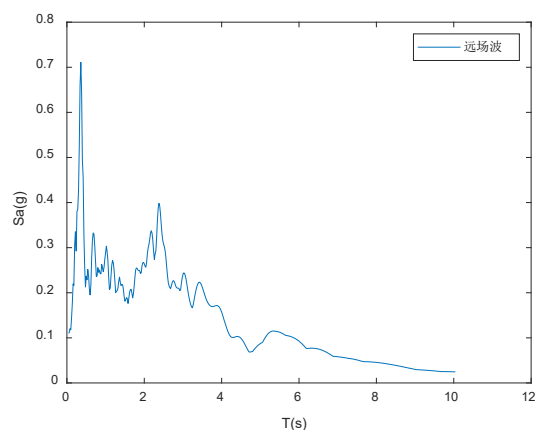
本文分别选取了具有明显破裂方向性效应和滑冲效应的近场地震动实测记录各一条作为输入地震波,其中,含破裂方向性效应的地震波编号为 FD,滑冲效应为 FS。同时,选取了一条实测远场地震动波,编号为 FF,三条地震波的反算反应谱如图 3 所示。由于谱加速度能够较好地反映地震动强度对于结构地震响应的影响^[8-10],故将三条地震波在纵向质量参与系数最大一阶振型对应的谱加速度调到同一水平,以水平向+竖向作为地震动输入方向,进行非线性动力时程分析。



(a) 破裂方向性效应近场地震波 (FD) 反应谱



(b) 滑冲效应波近场地震波 (FS) 反应谱

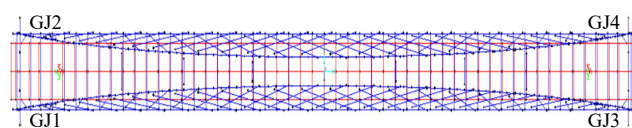


(c) 远场地震波 (FF) 反应谱

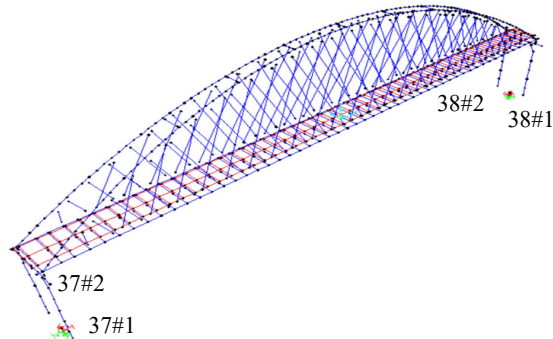
图 3 调幅后所选地震波反应谱对比图

3.4 地震响应非线性动力时程分析

算例桥梁关键控制截面包括过渡墩墩底截面与拱脚截面共 8 个截面,截面位置如图 4 所示。本文选择纵桥向地震响应为例进行对比分析,具体见表格 1 和表 2。



(a) 主拱圈关键截面位置编号



(b) 主桥桥墩截面位置编号

图 4 算例桥梁关键控制截面位置示意图

表1 各控制截面地震响应内力值

位置	截面	轴力 P / kN			弯矩 M _y / kN·m		
		FD	FS	FF	FD	FS	FF
37#过渡墩墩底截面	37#-1	4116	3637	2868	240717	175579	128122
	37#-2	4215	3710	2990	240745	175787	127911
38#过渡墩墩底截面	38#-1	4212	3758	3002	54034	44670	37238
	38#-2	4297	3854	3127	54143	44458	37201
拱脚截面	GJ-1	5978	4559	3086	4013	3323	2824
	GJ-2	5985	4454	3322	1477	1433	1044
	GJ-3	5974	4599	3018	3910	3254	2734
	GJ-4	6014	4491	3264	1457	1416	1006

表2 各控制截面地震响应位移值

位置	方向	位移 / cm		
		FD	FS	FF
小桩号梁端	X	5.14	7.16	3.91
	Y	0.03	0.02	0.02
	Z	0.09	0.10	0.06
拱顶	X	5.29	7.66	4.45
	Y	0.07	0.08	0.08
	Z	3.32	3.51	3.27
大桩号梁端	X	5.62	7.96	4.90
	Y	0.02	0.02	0.01
	Z	0.04	0.07	0.03

对比分析表1和2可知,在同一地震动强度水平下,破裂方向性效应显著增大了轴力与弯矩值,滑冲效应次之,无脉冲特性的远场地震波对结构内力影响最小;对于纵桥向结构位移,无论在梁端处还是拱顶处,均为纵向位移最大,横向位移最小,且滑冲效应作用下的结构位移最大。对比分析关键控制截面地震响应内力值与位移值可知,即使具有相同的地震动强度水平,具有滑冲效应和破裂方向性效应的近场地震波也会显著增加大跨径网状拱桥的地震响应。其中,破裂方向性效应对网状拱桥的截面内力响应影响最大,而滑冲效应对结构位移影响更为显著,远场地震动的影响最小。

4 结论

本文选择了一座主跨为190m的下承式大跨径钢箱提篮网状拱桥作为研究对象,建立相应的非线性抗震有限元模型,分别选择具有破裂方向性效应与滑冲效应的实测地震波以及远场地震波各一条,采用纵桥向质量参数系数最大一阶振型对应的谱加速度作为地震动强度参数,通过调幅将该谱加速度调整到同一强度水平,采用纵桥向+竖向的地震动输入方向,进行非线性动力时程分析,对比分析三条地震波作用下算例桥梁各关键截面和节点的地震响应,可以获得以下结论:

(1)在同一地震动强度水平下,具有破裂方向性效应的近场地震波会显著增加大跨径网状拱桥的地震内力响应;

(2)在同一地震动强度水平下,具有滑冲效应的近场地震波会显著增加大跨径网状拱桥的地震位移响应;

(3)在同一地震动强度水平下,近场地震波由于不具有脉冲特性,其产生的地震响应最小。

参考文献:

- [1] 胡进军, 谢礼立. 地震破裂的方向性效应相关概念综述[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4):8-12.
- [2] 陶夏新, 王国新. 近场强地震动模拟中对破裂的方向性效应和上盘效应的表达[J]. 地震学报, 2003, 25(2):8-13.
- [3] 陈彦江, 梁金宝, 许维炳, 等. 近断层地震破裂方向性效应对装配式混凝土桥墩抗震性能影响试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(6):11-16.
- [4] 陈俊岭, 阳荣昌, 马人乐. 近断层地震滑冲效应下风力发电塔动力响应和振动控制试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(8):27-33.
- [5] 何仲太, 马保起, 李玉森, 等. 汶川地震地表破裂带宽度与断层上盘效应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(6):26-31.
- [6] 何晓慧. 中强地震破裂方向性测定方法及其在发震断层判定中的应用[D]. 中山大学, 2019, 29(5):7-12.
- [7] 李宏男, 陈国兴, 刘晶波, 等. 地震工程学[M]. 机械工业出版社, 2013.
- [8] Jonathan Hancock, and Julian J. Bommer. Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering. 2007, 27:291 - 299.
- [9] Baker J.W., Vector-Valued Ground Motion Intensity Measures for probabilistic Seismic Demand Analysis[D]. A Dissertation Submitted To The Department Of Civil And Environmental Engineering And The Committee On Graduate Studies Of Stanford University. 2005.
- [10] Luco N, Cornell AC. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake groundmotions[J]. Earthquake Spectra 2007; 23:357 - 392.