

曲线梁桥近断层地震响应分析*

左 焯, 孙广俊, 金昊贵, 李鸿晶

(南京工业大学土木工程学院 南京, 211800)

摘要 由于近断层地震动的脉冲特性, 结构在近断层地震下的动力响应与远场地震动下的情况存在较大不同。首先, 选取了近断层脉冲地震动、近断层非脉冲地震动及远场地震动 3 类地震动记录, 采用方差分析方法研究了 3 类地震动特征参数的差异; 其次, 以一典型的两跨曲线梁桥为工程案例, 建立了多尺度有限元模型, 对桥梁在 3 类不同地震动下的非线性时程响应分析进行了数值模拟, 从主梁响应、桥墩响应和支座响应等方面进行分析比较; 最后, 研究了近断层地震动对于曲线梁桥地震响应的影响以及地震动强度指标与曲线梁桥最大响应的相关性。研究表明: 3 类地震动的峰值地面位移和峰值速度与峰值加速度的比值具有明显的差异; 曲线梁桥在具有速度脉冲特性的近断层地震动作用下地震响应剧烈, 易引起主梁落梁、墩柱及支座破坏; 地震动强度指标峰值地面速度 (peak ground velocity, 简称 PGV)/峰值地面位移 (peak ground displacement, 简称 PGD) 与位移最大响应的相关性最好, 位移型地震动强度指标 PGD 和均方根位移 d_{rms} 与弯矩最大响应的相关性最好。

关键词 曲线梁桥; 地震响应; 近断层; 速度脉冲; 地震动强度指标

中图分类号 TU997; U441⁺.3

引 言

20 世纪 90 年代以来, 国内外近断层地震因其显著的速度脉冲特性对土木工程结构尤其是桥梁结构产生了灾难性的破坏^[1-3], 从而引起国内外学者的重点关注与研究。一方面, 近断层地震动具有强地震动集中性、速度脉冲特性(表现为前方向性效应和滑冲效应)、上盘效应和长周期脉冲等特点^[4], 使桥梁结构在近断层地震作用下的地震响应与远场情况下有较大不同; 另一方面, 曲线梁桥具有弯扭耦合特性以及空间非规则性, 其地震响应比直梁桥更为复杂, 且在国内外抗震设计规范中均未考虑近断层地震动脉冲的影响。因此, 研究近断层地震动作用下曲线梁桥的地震响应, 揭示近断层地震动特征的影响对于认识曲线梁桥近断层地震响应行为、完善近断层曲线梁桥抗震设计方法具有重要的理论意义和工程应用价值。

国内外相关研究表明, 近断层地震动速度脉冲的幅值和周期是影响土木工程结构抗震性能的重要参数^[5-6], 针对桥梁结构的近断层地震响应研究也随之逐步深入。Phan 等^[7]对两根依据规范设计的混

凝土桥墩进行了振动台试验, 研究了近断层地震动对混凝土墩柱性能的影响, 并根据分析结果提出了近断层地震动下桥梁墩柱抗震性能的评价体系。Liao 等^[8]分析了隔震与非隔震连续梁桥在近断层地震动作用下的动力响应, 研究表明桥墩位移与墩底剪力与 PGV 与 PGA 的比率相关性较大。石岩等^[9]对一座高速铁路连续梁桥分别输入具有速度脉冲特性的近断层地震动和无速度脉冲地震动进行了非线性时程分析, 研究了采用减震樨和拉索限位器的组合减震系统的减震效果。陈令坤等^[10]以高速铁路多跨简支梁桥为研究对象, 研究了其在近、远断层地震作用下地震响应, 研究表明近断层方向脉冲型地震作用下墩底梁体位移、墩顶位移以及墩底弯矩增大, 且导致更大的塑形变形。近年来, 国内外学者对于曲线梁桥实际震害以及振动台试验和地震模拟方面的研究逐步深入增多。文献[11-13]通过振动台系统对桥梁进行试验研究, 包括新型钢管混凝土组合桁架梁的抗震性能、地震动行波效应及局部场地效应对桥梁的影响和不同强度地震下大跨刚构桥梁的地震响应。Saiidi 等^[14]研究了跨越断层的两跨桥梁在地震作用下的响应, 研究表明断层破裂效应大大加重了桥梁的损伤。

* 国家自然科学基金资助项目(51308293); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20130937)

收稿日期: 2016-09-30; 修回日期: 2016-12-23

Wilson等^[15]研究了一斜曲桥梁在近断层竖向地震动作用下的抗震性能,并与对其应的直梁桥进行了对比分析,结果表明斜曲桥梁地震响应更为剧烈。目前,近断层地震动作用下桥梁地震响应研究主要针对于直梁桥,对于曲线梁桥主要集中于实际震害的分析以及振动台进行缩尺模型的试验研究,且大部分是在远场地震作用的情况下,近断层地震动下的研究有待进一步深入。

笔者以一典型的曲线连续梁桥为工程案例,建立桥梁多尺度有限元模型,分别输入近断层脉冲地震动、近断层非脉冲地震动及远场地震动3组地震动进行桥梁非线性时程响应分析,对比研究曲线梁桥在3类不同特征地震作用下的地震响应,以揭示近断层地震动特性的影响。在此基础上,研究曲线梁桥墩顶相对位移、墩底弯矩和主梁桥台相对位移的最大响应与4个地震动强度指标的相关性,确定合理的地震动强度指标,为曲线梁桥近断层地震动下的抗震时程分析提供依据。

1 地震波选取

1.1 3类地震动记录

从美国太平洋地震工程研究中心数据库(PEER)选取了3种类型的地震动记录,共计20条。其中,近断层脉冲地震动8条,近断层非脉冲地震动6条,远场地震动6条。选择原则如下:

- 1) 根据国内外大部分学者公认的对于近断层地震动的定义,选择近断层地震动的断层距小于20 km;
- 2) 考虑到地震动对于桥梁结构的破坏作用,选择地震动的震级在6级以上,峰值加速度在0.05g以上。

具体选择的地震动记录及其参数如表1所示。其中,编号1~8号为近断层脉冲地震记录,9~14号为近断层非脉冲地震记录,15~20号为远场地震记录。本研究各条地震动记录均按照《公路桥梁抗震细则》(JTG/T B02-01-2008)中8度抗震设防烈度的要求,将地震动峰值加速度调为0.3g作为桥梁结构输入。

表1 3种类型地震动特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of three types of earthquake ground motions

编号	地震	台站 (分量)	震级	断层距/ km	PGA/ g	PGV/ (cm · s ⁻¹)	PGD/ cm	PGV/PGA/ s
1	Imperial Valley-06	H-E04230	6.53	4.90	0.36	76.55	59.06	0.21
2	Imperial Valley-06	H-ECC092	6.53	7.31	0.23	68.78	39.42	0.30
3	Cape Mendocino	FOR090	7.01	15.97	0.11	21.69	12.75	0.20
4	Denali	PS10047	7.90	0.18	0.32	134.75	102.76	0.42
5	Chi-Chi	CHY101-E	7.62	9.96	0.35	70.65	45.31	0.20
6	Chi-Chi	TCU053-E	7.62	5.97	0.22	41.33	59.55	0.19
7	Chi-Chi	TCU068-E	7.62	3.01	0.51	279.88	297.15	0.57
8	Kocaeli	YPT060	7.51	1.38	0.27	65.74	57.04	0.24
9	Kocaeli	ARC000	7.51	10.56	0.22	17.69	13.65	0.08
10	Tabas	Iran-1	7.35	13.94	0.33	20.45	11.60	0.06
11	Chi-Chi	CHY028-E	7.62	3.14	0.65	72.82	14.69	0.11
12	Chi-Chi	TCU055-E	7.62	6.36	0.24	26.21	9.96	0.11
13	Chi-Chi	TCU079-E	7.62	10.95	0.74	61.24	39.39	0.08
14	Chi-Chi	TCU089-E	7.62	8.33	0.33	30.91	18.53	0.09
15	Kern County	TAF021	7.36	38.42	0.16	15.31	9.20	0.10
16	Imperial Valley-06	DLT262	6.53	22.03	0.24	26.00	11.98	0.11
17	Northridge-01	ACI000	6.69	65.84	0.07	3.21	0.38	0.05
18	Loma Prieta	A07000	6.93	41.68	0.16	15.66	8.27	0.10
19	Chi-Chi	ILA050-E	7.62	63.82	0.06	8.79	6.41	0.14
20	Cape Mendocino	BVS060	7.01	43.82	0.15	15.2	4.53	0.10

1.2 地震动特征参数差异

以 Denali 地震中 PS10047 台站典型近断层脉冲地震动记录为例,其加速度和速度时程如图 1 所示。可以看出,近断层脉冲地震动具有长周期速度脉冲,在特征参数方面与其他两类地震动有明显差异。

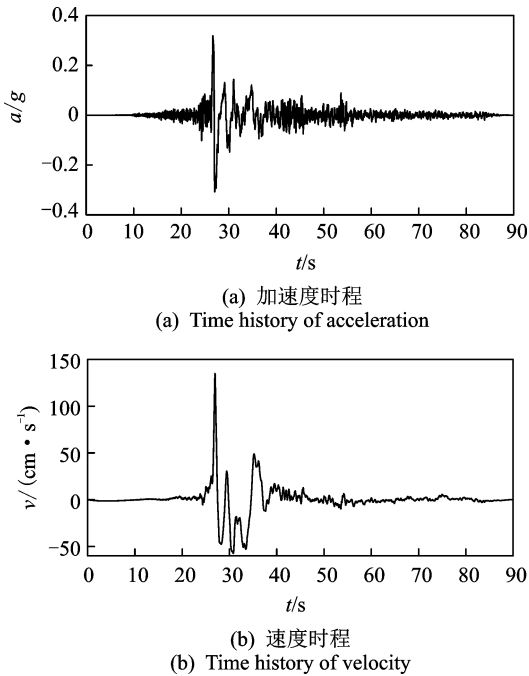


图 1 Denali 地震 PS10047 记录的加速度及速度时程

Fig. 1 Time history of acceleration and velocity record of Denali-PS10047

基于国内外学者对于近断层地震动特征参数的研究成果,选取 2 个地震动特征参数:峰值地面位移,峰值地面速度与峰值地面加速度(peak ground acceleration, 简称 PGA)比值(PGV/PGA),采用方差分析方法研究 3 类地震动特征参数的差异,结果如表 2 所示。

表 2 3 类地震动参数方差分析

Tab. 2 ANOVA analysis of three types of seismic ground motion parameters

参数	均方差	F 值	P 值
PGD	组间	12 541.81	3.74
	组内	3 350.99	
PGV/PGA	组间	3 150.77	33.04
	组内	95.35	

可以看出,3 类地震动的 PGD 和 PGV/PGA 两个特征参数的 P 值均在 5% 以内,说明 3 类地震动的两个特征值参数具有明显的差异。显然,这

种差异对于结构地震响应的影响较为显著,有必要对 3 类地震动作用下曲线梁桥地震响应进行深入研究。

2 曲线梁桥有限元模型

选取某曲率半径为 47.75m,桥梁总长度为 $2 \times 25\text{m}$ 的两跨钢筋混凝土曲线连续梁桥作为研究对象。桥梁上部主梁为连续箱梁,采用 C50 混凝土,桥面宽为 9.2m,高为 0.86m。下部采用双柱式圆形桥墩,桥墩布置于桥梁中部,桥墩高度为 8m,直径为 1.4m,间距为 4.8m。主梁中部与两桥墩之间均采用固定支座,主梁两端与桥台之间采用板式橡胶支座。

为了准确模拟曲线梁桥的地震响应并减少计算量,采用 ABAQUS 有限元软件建立曲线梁桥的多尺度有限元模型,如图 2 所示。主梁编号为 1~2,板式橡胶支座编号为 1~4。易发生塑性损伤的部位,如主梁梁端和桥墩的墩顶部位、受剪和受弯严重的桥墩墩底部位采用实体单元建模,并在划分网格时加密处理。不易发生非线性变形的部位,如桥墩部位、主梁中部和墩台分别采用梁单元、壳单元和刚体单元建模。结构的前 3 阶振型如表 3 所示。

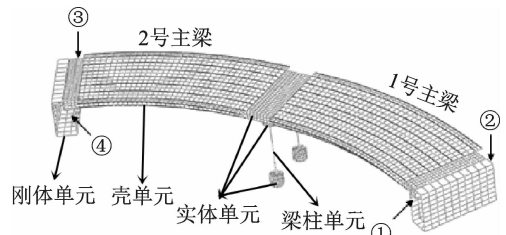


图 2 曲线梁桥有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the curved bridge

表 3 结构动力特性

Tab. 3 Structural dynamic characteristics

阶次	f / Hz	振型图
1	5.73	
2	7.23	
3	13.29	

在结构多尺度模拟计算中,不同尺度模型之间的界面连接处理是一个关键问题,必须满足不同单

元模型之间荷载传递的合理性以及变形的协调性。不同尺度模型的界面连接处理主要有两种方法：a. 变形协调法；b. 力的平衡法。根据文献[16]中数值模拟研究成果，本研究有限元模型梁单元节点与实体单元面的界面连接处根据平截面假定和内力平衡条件进行自由度协调处理。

混凝土采用 McKenna 提出的塑性损伤本构模型^[17]，其受拉本构关系骨架线为两段线，受压本构关系骨架线为三段线，如图 3(a)所示。钢筋采用循环荷载下多折线本构模型^[18]，考虑了累积损伤引起的钢筋构件受弯承载力退化，如图 3(b)所示。固定支座采用弹性连接单元模拟，板式橡胶支座理想化为库仑摩擦力模型，采用双线性连接单元模拟，其模型如图 4 所示。其中： K_x, K_y 为支座的水平弹簧刚度； K_z 为支座的竖向弹簧刚度。参数如表 4 所示。

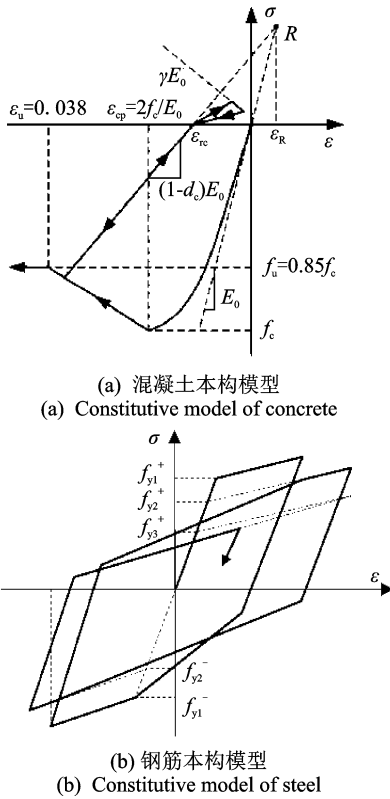


图 3 材料本构模型
Fig. 3 Material constitutive model

表 4 板式橡胶支座建模参数

Tab. 4 Modeling parameters of rubber bearing

支座类型	$K_x / (N \cdot m^{-1})$	$K_y / (N \cdot m^{-1})$	$K_z / (N \cdot m^{-1})$	$c / (Ns \cdot m^{-1})$	μ
滑动支座	3.5×10^7	3.5×10^7	1.5×10^{11}	400	0.15

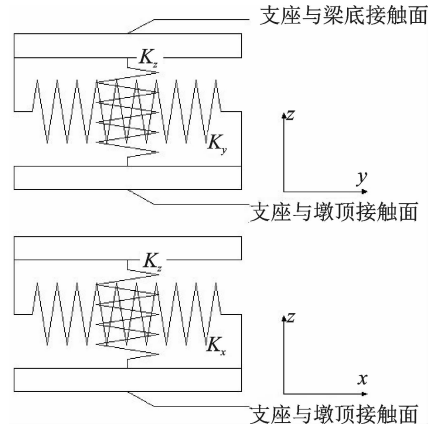


图 4 板式橡胶支座模型示意图
Fig. 4 Sketch of laminated rubber bearing model

不考虑土-结构相互作用，桥墩墩底和桥台底部按固结处理。考虑到曲线梁桥的弯扭耦合振动特性和最不利地震动输入角度，将地震动沿曲线梁桥梁端支座中心连线方向输入，输入的地震动分别为表 1 中的 8 条近断层脉冲地震动、6 条近断层非脉冲地震动和 6 条远场地震动。

3 曲线梁桥地震响应分析

3.1 主梁响应

在典型的近断层地震动(3号地震动)作用下，曲线梁桥主梁右端位移时程曲线如图 5 所示。可以看出，在近断层地震动下，曲线梁桥主梁的径向和切向位移均较大，切向位移的峰值达到了近 0.4m，响应显著。

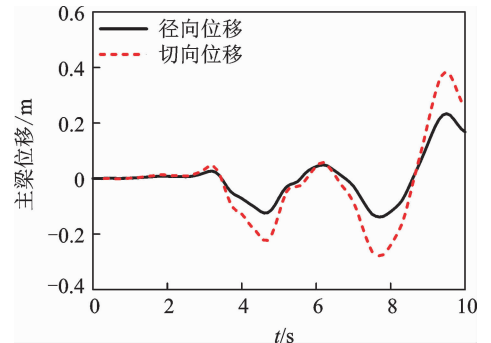


图 5 近断层地震动下主梁位移时程
Fig. 5 Time history of main girder displacement under near-fault ground motion

在 3 类不同特征地震动作用下，曲线梁桥 1 号主梁梁端与桥台的相对位移峰值与 PGV/PGA 及

PGD 的关系如图 6 所示。

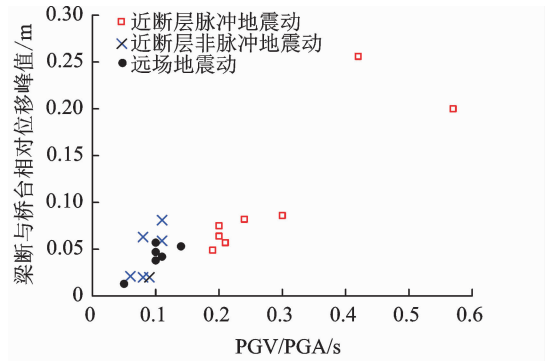
从图 6 可以看出,在近断层脉冲地震作用下,曲线梁桥梁端与桥台的相对位值均较大,曲线梁桥地震响应强烈,近断层速度脉冲特性是桥梁结构响应强烈的关键因素。在近断层非脉冲地震作用和远场地震作用下,地震响应基本相当,近断层非脉冲地震作用下的梁端与桥台相对位值要稍大于远场地震,但二者的相对位移的最小值与分布范围都要小于近断层脉冲地震作用下的情况。

从图 6(a)可以看出,曲线梁桥梁端与桥台的相对位移与 PGV/PGA 值有一定的相关性,随着 PGV/PGA 值的增大,曲线梁桥的地震响应逐渐强烈。在近断层脉冲地震作用下,当 PGV/PGA 值大于 0.3 时,相对位移明显增大。

从图 6(b)可以看出,在近断层脉冲地震作用下,梁端与桥台的相对位移与 PGD 值也具有一定的相关性,当 PGD 值超过 100cm 时,相对位移明显增大。显然,过大的梁端与桥台相对位移可能导致主梁的移位甚至落梁,这在桥梁抗震设计中应重点关注。

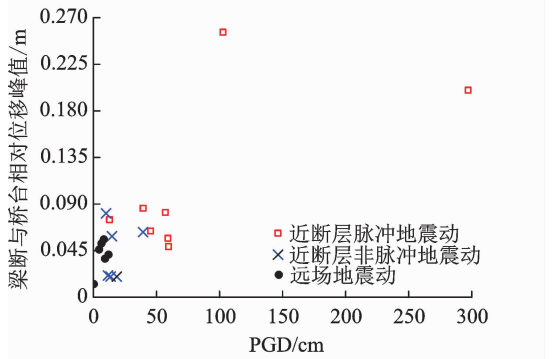
3.2 桥墩响应

在 3 类不同特征地震动作用下,曲线梁桥的内侧桥墩墩顶相对墩底位移(简称墩顶相对位移)和墩



(a) 相对位移与PGV/PGA关系

(a) Relation between relative displacement and PGV/PGA



(b) 相对位移与PGD关系

(b) Relation between relative displacement and PGD

图 6 主梁梁端与桥台的相对位移

Fig. 6 Relative displacement between girder and abutment

底弯矩如表 5 所示。

表 5 桥墩地震响应

Tab. 5 Seismic responses of bridge pier

地震 编号	近断层脉冲地震动下 桥墩地震响应		地震 编号	近断层非脉冲地震动下 桥墩地震响应		地震 编号	远断层脉冲地震动下 桥墩地震响应	
	墩顶相对 位移/mm	墩底弯矩/ (kN·m)		墩顶相对 位移/mm	墩底弯矩/ (kN·m)		墩顶相对 位移/mm	墩底弯矩/ (kN·m)
1	46	7 159	9	11	3 223	15	42	5 652
2	71	8 631	10	14	11 169	16	33	7 147
3	57	9 456	11	46	7 931	17	6	2 536
4	250	13 939	12	80	6 679	18	40	11 625
5	60	8 069	13	40	10 070	19	57	8 714
6	34	14 475	14	14	7 786	20	36	5 801
7	187	18 897						
8	81	11 237						
均值	98.25	11 482.88		34.17	7 809.67		35.67	6 912.5

从表 5 可以看出,由于近断层脉冲地震动的脉冲特性,曲线梁桥的墩顶相对位移和墩底弯矩值总体较近断层非脉冲地震及远场地震作用的情况大。桥墩地震响应与 PGV/PGA 及 PGD 的相关性密切,编号为 4 和 7 的近断层脉冲地震动的 PGV/PGA 以及 PGD 值较其他近断层脉冲地震大,其曲

线梁桥桥墩地震响应值较其他近断层脉冲地震动剧烈,墩顶相对位移分别达到了 250 和 187 mm,墩底弯矩分别达到了 13 939 和 18 897 kN·m,易导致较大的墩柱塑性变形。近断层非脉冲地震动和远场地震动下的桥墩地震响应基本相当,二者墩顶相对位移明显小于近断层脉冲地震动作用下的情况,近断

层非脉冲地震动作用下墩底弯矩要稍大于远场地震动。

曲线梁桥墩底弯矩与地震动特征参数 PGV/PGA 的关系如图 7 所示,其中实线为拟合的线性回归线。

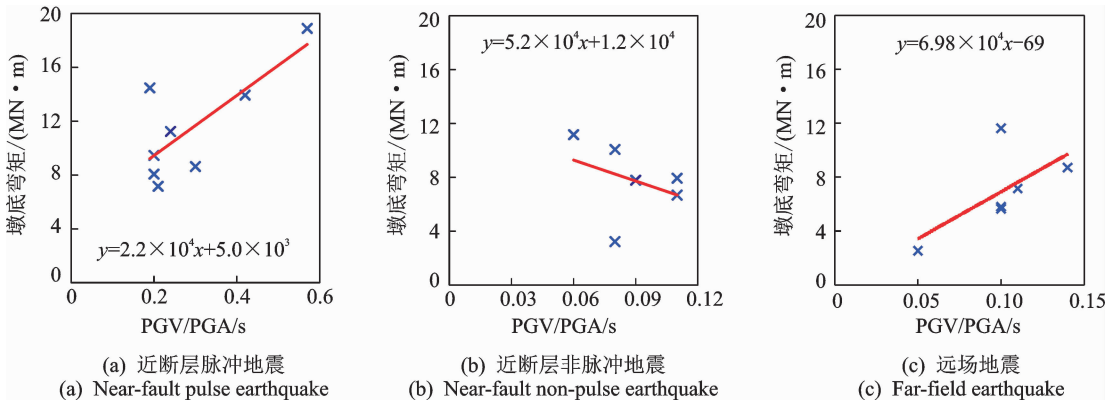


图 7 墩底弯矩与 PGA/PGV 的关系

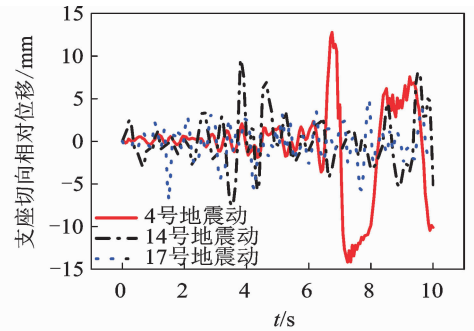
Fig. 7 Relationship between bending moment at the bottom of pier and PGV/PGA

从图 7 可以看出,曲线梁桥在近断层脉冲地震动作用下,墩底弯矩值较大,其地震响应较另外两类无脉冲的地震动强烈。从图 7(a)可以看出,近断层脉冲地震作用下,墩底弯矩最大值达到了 18 897 kN·m。近断层脉冲地震作用下桥墩的墩底弯矩较快进入塑性阶段,速度脉冲特性是响应强烈的关键因素。在近断层非脉冲地震动作用及远场地震动作用下,曲线梁桥的墩底位移值大小基本相当,数值分布范围和大小也较近断层脉冲地震动小。3 类地震动的墩底弯矩值与 PGV/PGA 值具有一定的相关性,尤其是近断层脉冲地震动作用情况,随着 PGV/PGA 值的增大,墩底弯矩值明显增大。可见,近断层脉冲地震动使曲线梁桥地震响应剧烈,墩底弯矩和剪力均较大,在桥梁抗震设计中应该重点关注,避免造成桥墩的弯曲及剪切破坏。

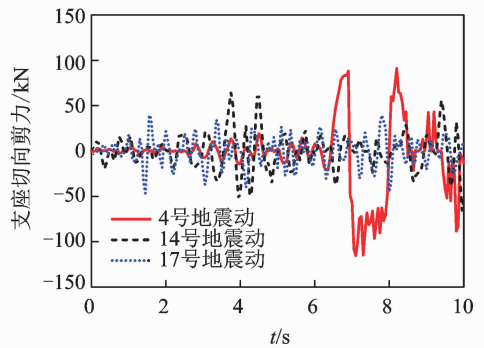
3.3 支座响应

以 5 号固定支座和 1 号滑动支座为研究对象,分析 3 类地震作用下桥梁支座的动力响应。3 类地震动下曲线梁桥固定支座切向相对位移时程以及滑动支座切向剪力时程如图 8 所示。支座沿桥梁切向剪力与 PGV/PGA 的关系如图 9 所示。

从图 8 可以看出,不同类型地震动作用下,曲线梁桥支座响应具有明显的差异。近断层脉冲地震动由于其长周期脉冲特性,支座响应较为强烈,支座切向相对位移和剪力峰值较其他两类地震动大。在近断层非脉冲及远场地震动作用下,支座响应相当,近断层非脉冲地震动作用下的切向相对位移和剪力峰值要稍大于远场地震动。



(a) 固定支座切向位移时程
(a) Time history of fixed bearing tangential displacement



(b) 滑动支座切向剪力时程
(b) Time history of sliding bearing tangential shearing force

图 8 支座响应对比

Fig. 8 Comparison of bearing response

从图 9 可以看出,在不同类型的地震动作用下,具有速度脉冲效应的近断层脉冲地震动作用下曲线梁桥的支座切向剪力明显比其他两种类型地震动大,其最大值达到了 115.3 kN。近断层非脉冲地震动和远场地震动作用下的支座切向剪力相当。同时,支座切向剪力与 PGA/PGV 值具有一定的相关性,PGV/PGA 值越大,支座切向剪力也越大,在近

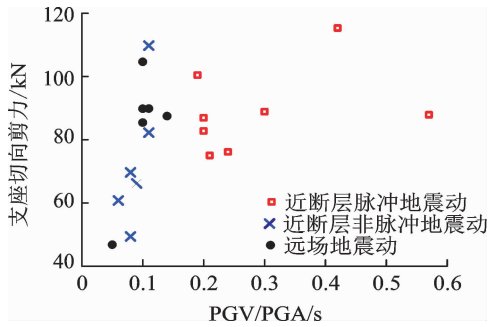


图 9 支座切向剪力与 PGV/PGA 的关系

Fig. 9 Relationship between bearing tangential shearing force and PGV/PGA

断层脉冲地震动作用下尤为明显。近断层脉冲地震动使得板式橡胶支座响应强烈,支座切向剪力较大,过大的支座剪力容易造成支座破坏。

4 强度指标相关性

桥梁结构进行时程分析时,依据合理的地震动强度指标,选择和调整输入结构的地震波,可以减小不同输入下的时程分析差异,更准确地描述地震动特性对于桥梁地震反应的影响。从曲线梁桥地震响应研究可以看出,PGV/PGA 和 PGD 与曲线梁桥地震响应具有一定的相关性。在此基础上,选取 4 种地震动强度指标:PGV/PGA, PGD, d_{rms} (均方根位移)和 v_{rms} (均方根速度),采用线性回归拟合的方法研究曲线梁桥最大响应与地震动强度指标的相关性。采用线性回归拟合线的相关系数 R 反映地震动强度指标与曲线梁桥最大响应的关系。

图 10~12 为曲线梁桥墩顶相对位移、墩底弯矩和主梁桥台位移的最大响应与地震动强度指标的相关性。表 6 为曲线梁桥墩顶相对位移、墩底弯矩和主梁桥台相对位移与地震动强度指标的相关系数。

表 6 曲线梁桥最大响应与地震强度指标的相关系数

Tab. 6 Ground motion intensity indices of maximum response of curved bridge

地震动强度指标	相关系数 R		
	墩顶相对位移	墩底弯矩	主梁桥台相对位移
PGV/PGA	0.676 95	0.507 76	0.706 24
PGD	0.299 85	0.622 74	0.318 32
d_{rms}	0.244 71	0.650 91	0.261 79
v_{rms}	0.183 59	0.318 87	0.171 44

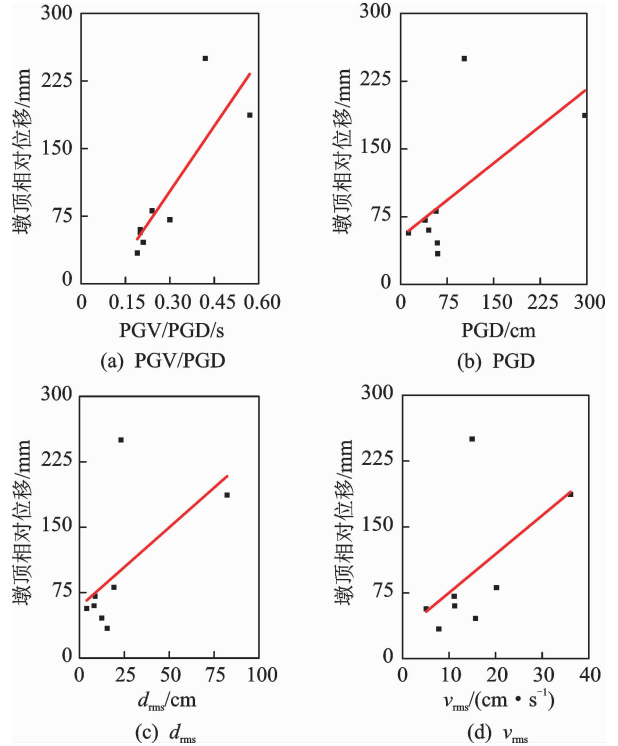


图 10 墩顶相对位移与地震强度指标相关性

Fig. 10 Correlation between pier top relative displacement and ground motion intensity indices

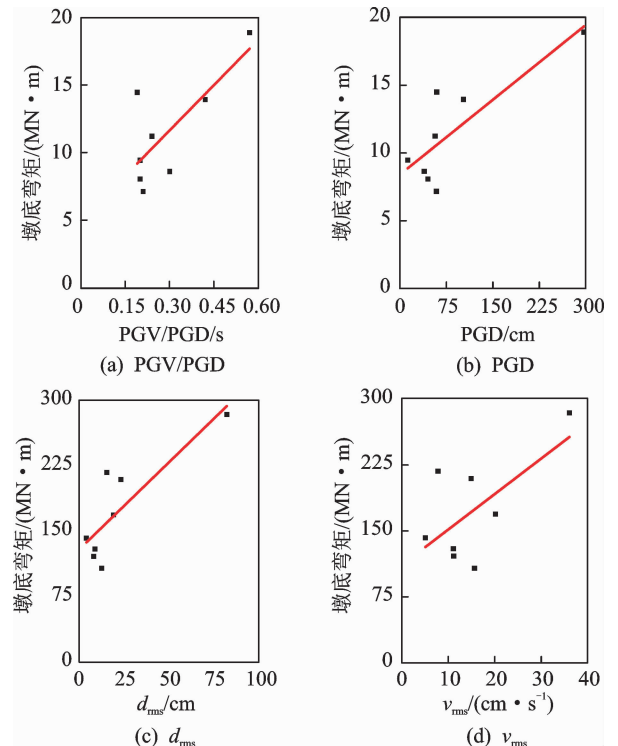


图 11 墩底弯矩与地震强度指标相关性

Fig. 11 Correlation between pier bottom bending moment and ground motion intensity indices

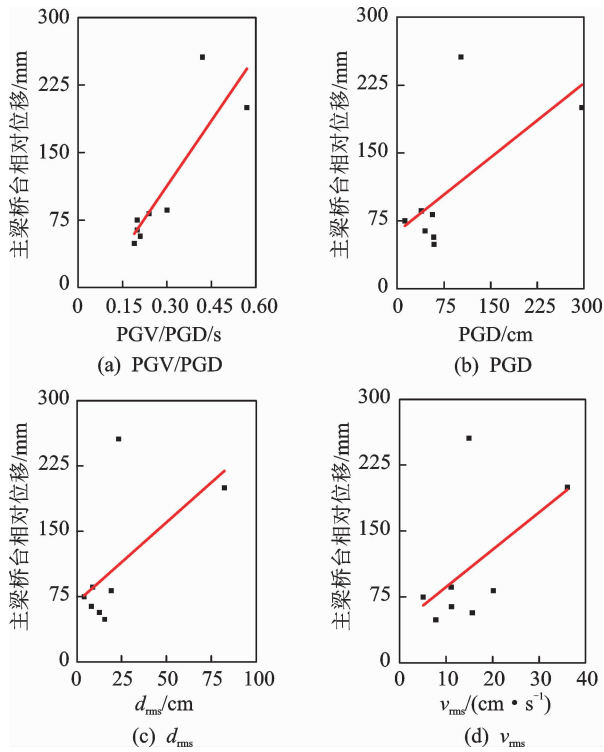


图 12 主梁桥台相对位移与地震强度指标相关性

Fig. 12 Correlation between relative displacement between girder and abutment and ground motion intensity indices

可以看出,对于曲线梁桥墩顶相对位移的最大响应,PGV/PGA 的相关性要明显优于其他 3 个地震动强度指标,相关系数达到了 0.676 95,其他 3 个地震动强度指标的相关系数均小于 0.3。对于墩底弯矩的最大响应,位移型地震动强度指标 PGD 和 d_{rms} 的相关性要比其他两个指标好,尤其是均方根位移 d_{rms} 的相关性最优,PGV/PGD 的相关系数也达到了 0.5 以上,具有一定的相关性。对于主梁桥台相对位移的最大响应,PGV/PGA 的相关性最优,相关系数远大于其他 3 个地震动强度指标。根据上述分析,对于近断层作用下曲线梁桥进行时程分析时,分析位移响应选择地震动强度指标 PGV/PGA 较为合理;而分析弯矩响应选择位移型地震动强度指标更为合理。

5 结论

1) 近断层脉冲地震动、近断层非脉冲地震动和远场地震动的峰值地面位移以及峰值速度与峰值加速度的比值(PGV/PGA)具有明显差异,近断层脉冲地震动相比其他两类地震动具有长周期速度脉冲

特性,曲线梁桥在 3 类地震动下的地震响应不同。

2) 近断层脉冲地震动由于其速度脉冲特性,曲线梁桥在其作用下的响应明显大于近断层非脉冲地震动以及远场地震动作用下的响应。曲线梁桥在近断层非脉冲地震动作用下的响应稍大于远场地震动,二者差异并不明显。速度脉冲特性与曲线梁桥本身特性的耦合,使曲线梁桥地震响应较为强烈。

3) 在近断层脉冲地震动作用下,曲线梁桥主梁与桥台的相对位移、墩顶相对位移、墩底弯矩及支座切向剪力较大,容易发生主梁落梁、墩柱损伤破坏以及支座破坏。

4) 近断层地震下曲线梁桥反应显著,需要选择合理的地震动强度指标,准确描述地震动特性对于桥梁反应的影响,建议分析位移响应,选择地震动强度指标 PGV/PGA;而分析弯矩响应,选择位移型地震动强度指标如 d_{rms} 或者 PGD。一方面,墩梁相对位移大,上部结构更容易发生落梁,需要考虑增加纵向防落梁措施;另一方面,下部桥墩地震作用强烈,若采用墩梁连接防落梁措施时要防止桥墩附加地震作用过大,造成桥墩损伤加重,建议采用两级防落梁模式。

参 考 文 献

- [1] 李鸿晶,陆鸣,温增平,等. 汶川地震桥梁震害的特征[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2009,31(1):24-29.
Li Hongjing, Lu Ming, Wen Zengping, et al. Characteristics of bridge damages in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Nanjing Tech University: Natural Science Edition, 2009, 31(1): 24-29. (in Chinese)
- [2] Wang Guoqiang, Zhou Xiyuan, Zhang Peizhen, et al. Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(1): 73-96.
- [3] 张莹,孙广俊,李鸿晶. 开洞填充墙对混凝土框架柱地震损伤影响分析[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(5):932-937.
Zhang Yin, Sun Guangjun, Li Hongjing. Numerical simulation on seismic damage of reinforced concrete frame columns considering the influence of infill walls with opening[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 932-937. (in Chinese)
- [4] 刘启方,袁一凡,金星,等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(1):1-10.
Liu Qifang, Yuan Yifan, Jin Xing, et al. Basic charac-

- teristics of near-fault ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)
- [5] Krawinkler H, Alavi B. Development of improved design procedures for near-fault ground motions[C]// SMIP98, Seminar on Utilization of Strong Motion Data. Oakland: [s. n.], 1998:21-41.
- [6] Zhang Y, Iwan W D. Active interaction control of tall buildings subjected to near-field ground motions[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(1): 69-79.
- [7] Phan V, Saiidi M S, Anderson J, et al. Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(7): 982-989.
- [8] Liao W I, Loh C H, Lee B H. Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(14): 2173-2183.
- [9] 石岩, 王东升, 孙治国. 近断层地震动下减隔震桥梁地震响应分析[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(3): 19-24.
Shi Yan, Wang Dongsheng, Sun Zhiguo. Analysis of seismic response of seismically mitigated and isolated bridge subjected to near-fault ground motion [J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(3): 19-24. (in Chinese)
- [10] 陈令坤, 张楠, 胡超, 等. 近断层地震方向脉冲效应对高速铁路桥梁弹塑性反应的影响[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(15): 149-155.
Chen Lingkun, Zhang Nan, Hu Chao, et al. Effects of near-fault directivity pulse-like ground motion on elastic-elastic seismic response of high-speed railway bridge[J]. *Journal of Vibration and Rock*, 2013, 32(15): 149-155. (in Chinese)
- [11] Huang Y, Briseghella B, Zordan T, et al. Shaking table tests for the evaluation of the seismic performance of an innovative lightweight bridge with CFST composite truss girder and lattice pier[J]. *Engineering Structures*, 2014, 75: 73-86.
- [12] Li Xi, Zhang Deyi, Yan Weiming, et al. Shake-table test for a typical curved bridge: Wave passage and local site effects[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 20(2): 04014061.
- [13] Zong Zhouhong, Xia Zhanghua, Liu Haihong, et al. Collapse failure of prestressed concrete continuous rigid-frame bridge under strong earthquake excitation: testing and simulation[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(9): 04016047.
- [14] Saiidi M S, Vosooghi A, Choi H, et al. Shake table studies and analysis of a two-span RC bridge model subjected to a fault rupture[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 19(8): A4014003.
- [15] Wilson T, Chen S, Mahmoud H. Analytical case study on the seismic performance of a curved and skewed reinforced concrete bridge under vertical ground motion [J]. *Engineering Structures*, 2015, 100: 128-136.
- [16] Sun Guangjun, Luo Ren, Zuo Ye, et al. Application of multi-scale finite element modeling in bridge seismic damage and collapse analysis[C]// *Challenges and Advances in Sustainable Transportation Systems*. Virginia: ASCE, 2014: 580-587.
- [17] Mckenna F T. Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing [D]. CA: University of California, Berkeley, 1997.
- [18] 曲哲. 摇摆墙-框架结构抗震损伤机制控制及设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.



第一作者简介: 左焯,男,1989年7月生,博士生。主要研究方向为工程结构抗震。

E-mail: zuoye89@126.com

通信作者简介: 孙广俊,男,1979年10月生,副教授。主要研究方向为工程结构抗震。

E-mail: gjsun2004@163.com

