

断层地震动对隔震桥梁地震响应的影响

杨怀宇, 李建中

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 以一跨断层简支桥梁为工程背景, 根据已有脉冲模型, 生成了模拟断层效应的地面运动. 在此基础上, 建立了跨断层桥梁空间有限元模型, 应用非一致激励的非线性时程分析方法, 研究了断层断裂效应对隔震桥梁的影响. 还分别针对采用铅芯橡胶支座和盆式橡胶支座两种支座系统, 研究了考虑和不考虑断层跨越效应对结构的地震响应影响. 研究结果表明, 断层效应对结构的地震响应影响非常大, 会较大地增加结构地震响应.

关键词: 简支梁桥; 近断层地面运动; 断层跨越; 空间变化; 隔震

中图分类号: U441⁺.3

文献标志码: A

Response Analysis of Seismic Isolated Bridge Under Influence of Fault-Crossing Groundmotions

YANG Huaiyu, LI Jianzhong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper was based on the engineering background of a simple bridge across the fault. According to the proposed pulse models, a set of synthetic fault-crossing strong ground motions was generated and the finite element model of a simple bridge across the fault was built, utilizing the non-uniform excitation nonlinear time history analysis method to investigate the effect of the fault rupture on a seismic isolated bridge. Two different bearing systems, without and with accounting for differential ground movement across the fault rupture, were considered in the analysis to evaluate and compare the performances of the structure. The analysis indicate that the fault crossing is an important factor in the earthquake response of seismically isolated bridges which increases the earthquake response of the structure larger.

Key words: a simple bridge; near-fault ground motion; fault

crossing; spatial variability; seismic isolation

在上个世纪 90 年代, 美国、土耳其和中国台湾相继发生了 Loma Prieta (1990 年)、Northridge (1994 年)、Duzce (1999 年) 和集集 (1999 年) 等地震, 由于这些地震发生在城市周边, 对土木工程结构产生了灾难性的破坏, 由此引发了人们对近断层和跨断层结构的抗震关注. 尽管国内外相关抗震规范都在条例中给出了结构应尽量避免建造在地震活动断层区域的建议, 但对于如水渠、隧道、管线、路堤和桥梁等跨越不同地形的长跨基础设施和结构, 完全避免结构物跨越断层很难实施. 当结构物不可避免地跨越活动断层时, 设计就须考虑地震中的断层效应. 迄今为止, 只有少量的研究文献对这一问题进行了阐述, 国内外工程界尚未对跨断层桥梁确立合理的抗震设计理念.

地震时, 断层效应通常有两种, 方向性效应和滑冲效应. 方向性效应会引起一个双边速度脉冲, 滑冲效应会引起一个单向速度脉冲. 对于方向性效应引起的脉冲, Makris 等^[1] 用一个余弦函数来模拟, Somerville^[2] 则用简单的三角形脉冲来考虑; 对于滑冲效应引起的脉冲, Makris 等^[1] 和 Abrahamson^[3] 均采用一个周期的正弦波在加速度时程中来模拟滑冲.

Goel 等^[4] 采用 Dreger 等^[5] 计算得到的跨断层地震波, 对美国加州跨断层的钢筋混凝土梁桥进行地震响应分析, 并对挡块在近断层与跨断层地震动作用下的不同响应进行了说明. Park 等^[6] 和 Ucak 等^[7] 分别采用不同方法模拟生成的跨断层地震动, 对位于土耳其 Duzce 断层处的高架桥进行了分析.

本文针对我国广泛采用简支梁桥的特点, 首先根据断层类型, 生成跨断层桥梁场地地震动输入, 采

收稿日期: 2014-07-08

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划 (2013CB036302)

第一作者: 杨怀宇 (1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震. E-mail: yhy20060507@sina.com

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

用非一致激励的非线性时程分析方法,研究了跨越断层区简支梁桥的地震响应特点,并对近断层和跨断层工况下采用隔震支座和普通支座的桥梁响应进行了比较分析。

1 跨断层桥位处强地面运动的模拟

跨断层地面运动通常包括方向性效应和滑冲效应,如图1所示。断裂的方向性效应出现在垂直于断层方向上,该效应的主要特征是速度时程表现出幅值很大,周期较长的速度脉冲;滑冲效应一般会出现现在平行于断层方向上,通常是由发震断层两侧的永久错位引起,它在位移时程上会表现出永久位移的特征。图2分别给出了在Imperial Valley地震(1979,矩震级 $M_w=6.4$)和Landers地震(1992, $M_w=7.3$)中记录到的两条近场地震波,这两次地震均为走滑型地震。

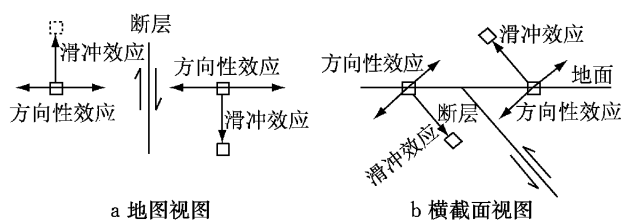


图1 断层类型和其效应特征

Fig.1 Types of fault and features of their effects

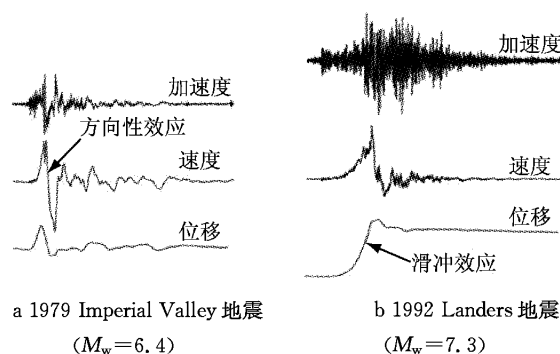


图2 实测跨断层特征地震动

Fig.2 Across-fault strong ground motion

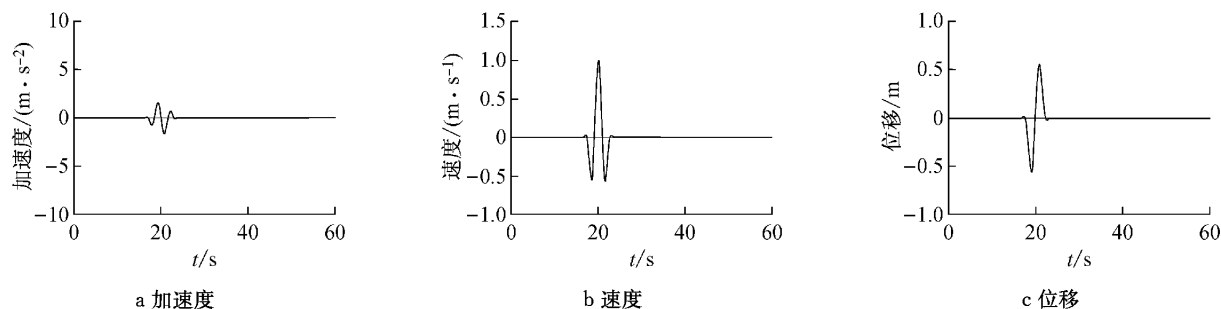


图3 模拟跨断层地面运动垂直断层的方向脉冲构成

Fig.3 Formation of fault-normal component of simulated across-fault ground motion

Abrahamson^[3]和Mavroeidis等^[8]研究表明,模拟的跨断层地面运动中的方向性效应地面运动,可以由具有跨断层特征的低频方向性脉冲和相应远场的地面运动作为高频部分合成得到;模拟的跨断层地面运动中的滑冲效应地面运动,可以由具有跨断层特征的低频滑冲脉冲和相应远场的地面运动作为高频部分合成得到。方向性脉冲部分采用文献[9]提出的方向性脉冲模型进行模拟;滑移脉冲部分采用文献[10]提出的滑冲脉冲模型进行模拟;余下的高频部分基于太平洋地震工程研究中心的强地震数据库,选取相应的不含脉冲的远场地面运动。下面对各分项模拟进行具体说明。

1.1 方向性脉冲的模拟

文献[9]提出的方向性脉冲模型如下式:

$$v(t) = \begin{cases} \left\{ \frac{1}{2} V_p \cos \left[2\pi \left(\frac{t-t_0}{T_p} \right) + \nu \right] - \frac{D_r}{\gamma T_p} \right\} \cdot \\ \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\gamma} \left(\frac{t-t_0}{T_p} \right) \right] \right\}, \\ t_0 - \frac{\gamma}{2} T_p < t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2} T_p \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$D_r = V_p T_p \frac{\sin(\nu + \gamma\pi) - \sin(\nu - \gamma\pi)}{4\pi(1 - \gamma^2)} \quad (2)$$

式中: V_p 为信号的幅值; T_p 为调幅谐波的主要周期; ν 为调幅谐波的相位; γ 为信号激励特征的参数(越大穿过0坐标轴的次数越多); t_0 为指定峰值出现的时刻; D_r 为用来消除非零残余位移。方向性效应模拟时, γ 取为2, V_p 取为 $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; T_p 由矩震级 M_w 反算确定, M_w 取为6.91级。其中 T_p 可以按下式计算:

$$\lg T_p = -2.9 + 0.5 M_w \quad (3)$$

按照文献[9]所给出的加速度函数和位移函数得到相应的加速度时程和位移时程,如图3所示,方向性脉冲在速度时程上显示为一个双边脉冲,且不存在残留位移。

1.2 滑冲脉冲的模拟

文献[10]提出滑冲脉冲模型如下式:

$$v(t) = \begin{cases} V_p \left(\frac{4}{\gamma T_p} \right)^4 \left[(t - t_0)^2 - \left(\frac{\gamma T_p}{2} \right)^2 \right]^2 \cdot \\ \cos \left[2\pi \frac{t}{T_p} + \nu \right], t_0 - \frac{\gamma}{4} T_p < t \leq \\ t_0 + \frac{\gamma}{4} T_p, \gamma \geq 1 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

1999 年 Somerville 等^[11]在自相似条件下,对滑冲模型参数提出了一些简单的预测公式

$$\begin{cases} T_r = 10^{0.5(M_w - 6.69)} \\ D = 10^{0.5(M_w - 2.91)} \\ T_p = 2T_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_r 表示断层面上代表性的点达到最后位移所花的时间; M_w 为地震的矩震级. 其中 T_r 是一个经常用到的物理概念, 它与方向性的脉冲周期和滑冲效

应的脉冲周期都存在很深的关系.

本文在模拟滑冲脉冲时, γ 取为 1. 根据错位 D 与震级 M_w 的统计关系, D 为 100 cm 时, 对应的震级为 6.91.

并按照文献[10]所给出的加速度函数和位移函数得到相应的加速度时程和位移时程, 如图 4 所示. 滑移脉冲在速度时程上显示为一个单边脉冲, 位移时程上则表现为一个永久的错位.

1.3 高频部分的选择

在进行跨断层方向性脉冲和滑移脉冲模拟时, 假设断层错位为 1 m, 跨断层地震动脉冲是地震震级为 6.91 级所引起. 因此, 对于远场高频的地震动, 在震级范围 6.6~7.1 内选取, 保证包含 6.91 这一震级. 在太平洋地震工程研究中心的强地震数据库中, 并按 Osmar Rodriguez 等^[12]提出的远场波选波原则, 选择与之相匹配的 10 组远场地震动如表 1 所示.

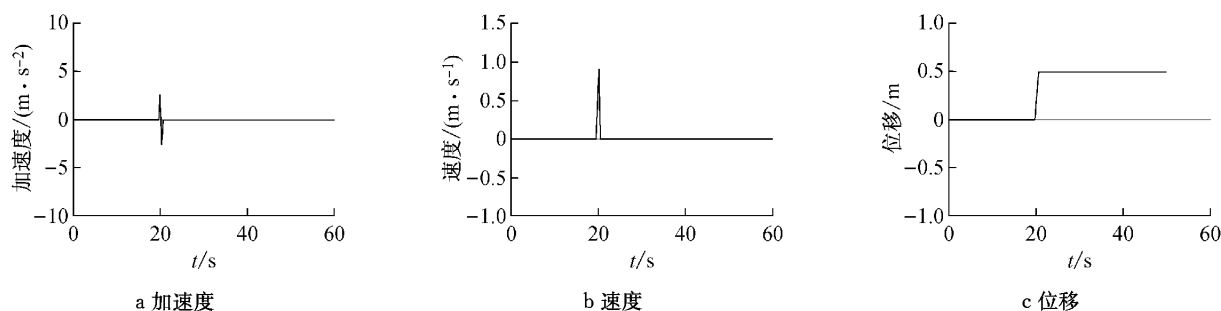


图 4 模拟跨断层地面运动平行断层方向分量的构成

Fig.4 Formation of fault-parallel component of simulated across-fault ground motion

表 1 所考虑的基本地面运动组

Tab.1 Summary of considered base ground motion pairs

编号	垂直断层方向	平行断层方向	竖直方向	时间步长/s	点数	放大系数
1	BORREGO/A-SON_FN	BORREGO/A-SON_FP	BORREGO/A-SON-UP	0.005	8 000	14.32
2	LOMAP/SJW_FN	LOMAP/SJW_FP	LOMAP/SJW-UP	0.005	7 989	4.46
3	NORTHR/JAB_FN	NORTHR/JAB_FP	NORTHR/JAB-UP	0.010	3 499	6.69
4	LOMAP/BVC_FN	LOMAP/BVC_FP	LOMAP/BVC-UP	0.005	5 918	6.11
5	LOMAP/BVW_FN	LOMAP/BVW_FP	LOMAP/BVW-UP	0.005	7 816	3.08
6	LOMAP/CLD_FN	LOMAP/CLD_FP	LOMAP/CLD-UP	0.005	7 990	3.62
7	LOMAP/FMS_FN	LOMAP/FMS_FP	LOMAP/FMS-UP	0.005	7 949	3.98
8	NORTHR/SAR_FN	NORTHR/SAR_FP	NORTHR/SAR-UP	0.010	3 600	4.30
9	NORTHR/SOR_FN	NORTHR/SOR_FP	NORTHR/SOR-UP	0.010	3 648	8.47
10	NENANA/ps09_FN	NENANA/ps09_FP	NENANA/ps09-UP	0.005	10 999	35.90

注: 如 BORREGO/A-SON_FN 表示 BORREGO 地震中 A-SON 测站点记录垂直断层方向 (FN) 的加速度时程; 同样, FP 表示平行断层方向, UP 表示竖直方向.

1.4 跨断层地面运动的合成

地面运动合成时需注意, 垂直于断层方向上的方向性脉冲和平行于断层方向上的永久静力位移几乎同时发生^[2]. 并按照 Osmar Rodriguez 等^[12]提出

的合成方法生成垂直于断层方向和平行于断层方向上的运动分量. 鉴于篇幅, 图 5 仅给出一组模拟生成的跨断层水平地面运动. 从图 5 可以看出, 在垂直于断层方向上, 断层两侧的地面运动是一致的, 在平行

于断层方向上,断层两侧的地面运动大小相等,方向相反。其中竖向地震动仍采用其所选远场波的竖向

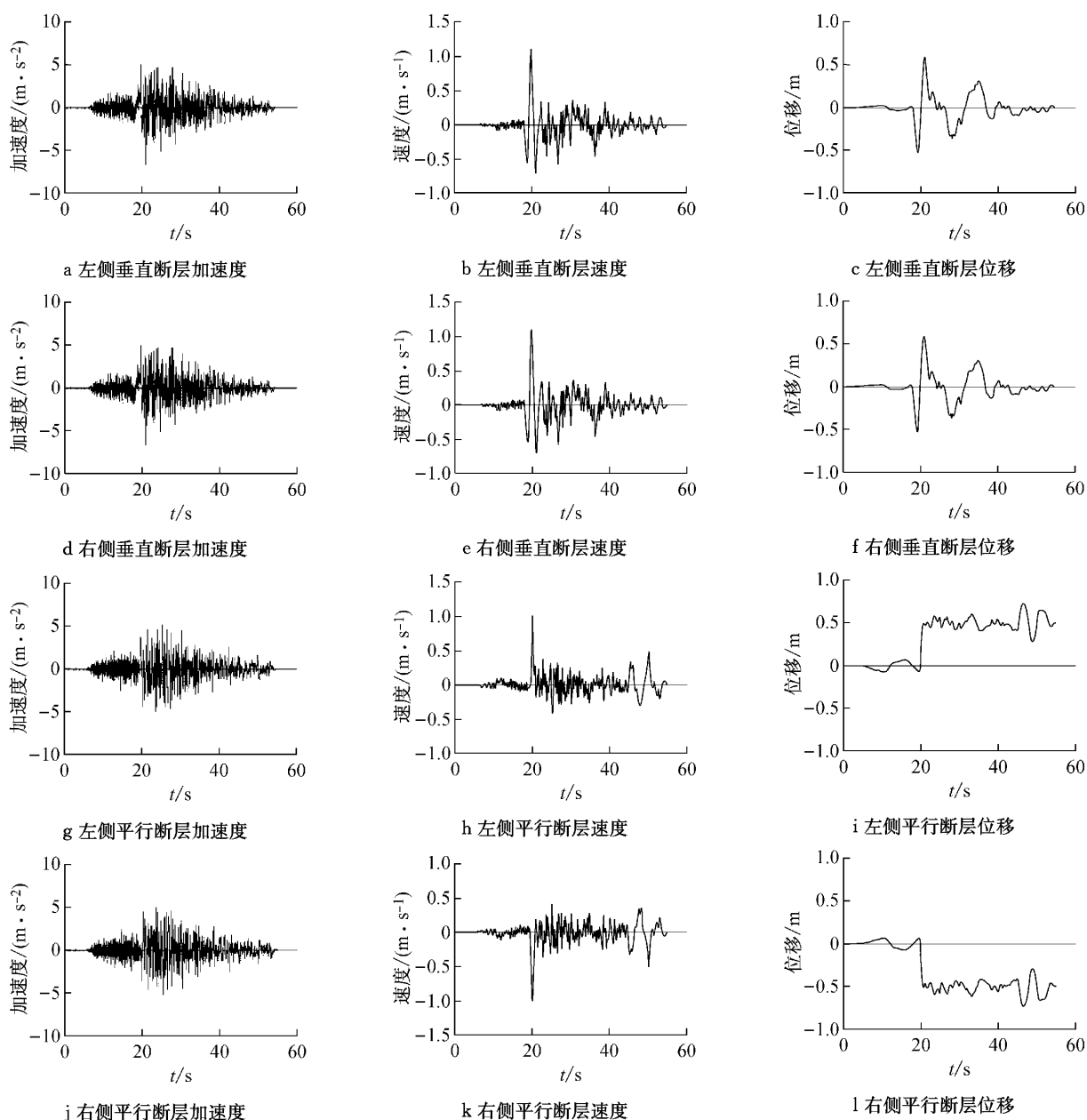


图5 断层两侧场地垂直断层方向和平行断层方向加速度、速度和位移时程

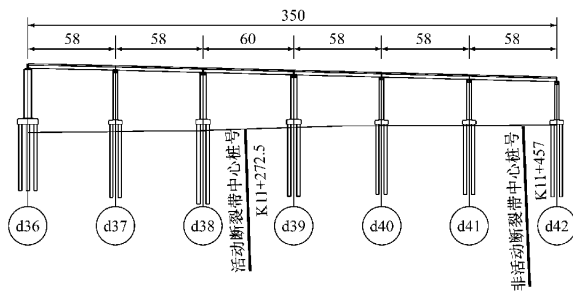
Fig.5 Time histories of fault-normal and fault-parallel components of acceleration, velocity and displacement of sites located at either side of fault trace

2 工程实例

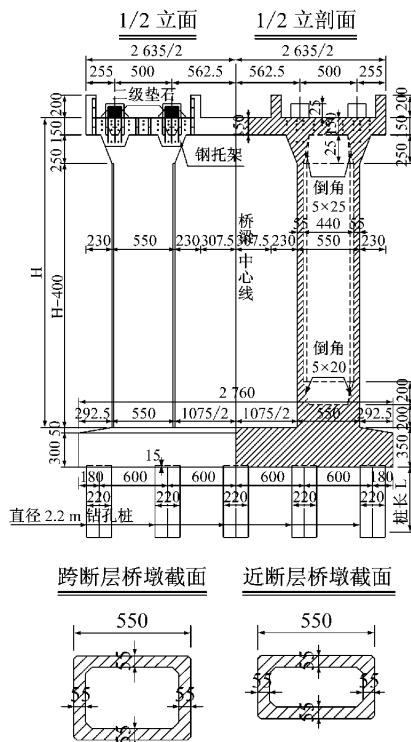
2.1 工程背景

本文以海南某跨断层桥梁为工程背景。该桥线路受地形等多方面因素的制约,将不可避免地位于海南强震区并且与一处断裂带相交。勘测结果显示:该处断裂为近垂直(略向西倾)、具有正断分量的走

滑断裂。该桥采用 58 m+58 m+60 m+58 m+58 m+58 m 的双幅简支钢箱梁跨越断层,其中 d38 和 d39 号桥墩位于断层两边,d38 和 d39 号桥墩尺寸为 5.5 m×4.0 m,其余桥墩尺寸为 5.5 m×3.0 m,且均为接近 30 m 的高墩;桥梁基础采用 2×2 桩径 2.2 m 的钻孔灌注桩支撑;全桥采用铅芯橡胶支座,型号为 J4Q 670×670×217 G 0.8。跨断层部分布置图如图 6 所示。



a 总体布置图(单位:m)



b 桥墩构造图(单位:cm)

图 6 跨断层桥型总体布置图

Fig.6 Layout of the bridge crossing the tectonic fault

2.2 有限元模型

为了比较断层效应对不同支撑体系简支梁桥地震响应效应的影响,分析时,分别采用铅芯橡胶支座与盆式橡胶支座两种类型进行比较分析.盆式橡胶支座在每跨梁体左右端分别采用单向活动盆式支座(横向固定)和固定盆式支座.跨断层桥梁有限元离散模型如图 7 所示.上部结构和桥墩均用三维弹性梁柱单元进行模拟.

铅芯橡胶支座采用非线性连接单元模拟,非线性连接单元的力-位移的恢复模型采用图 8 所示的双线性模型.图中, K_1 , K_2 和 Q 分别表示屈前刚度、屈后刚度和铅芯橡胶支座的屈服强度.对于固定盆式支座,墩梁间水平方向位移按固定约束模拟,而活动支座考虑摩擦效应.

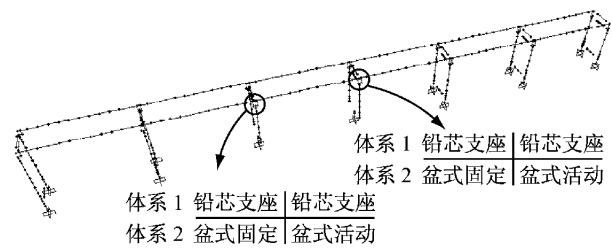


图 7 跨断层桥梁有限元离散模型

Fig.7 Finite element discretized model of the bridge traversed by fault rupture zone

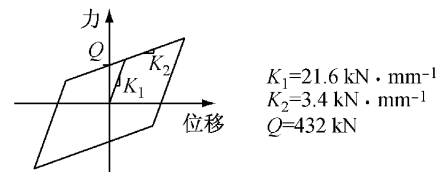


图 8 铅芯橡胶支座示意图

Fig.8 Schematic illustration of lead rubber bearing isolators

2.3 分析工况

在进行跨断层桥梁地震反应分析时,为了研究断层地震动效应,考虑以下两种工况:

工况 A 假设所选桥梁部分全部位于断层一侧,所有的桥墩墩底只取断层一侧的地面运动作为输入,即取图 5 中的一侧合成运动,按空间一致激励计算.

工况 B 假设桥梁跨越断层,承受空间非一致激励,其中 d38 和 d39 号墩分别位于断层两边.在垂直于断层方向上,全桥激励输入方向上保持一致,而在平行于断层方向上,d36~d38 号墩部分所受的激励与 d39~d42 号墩部分所受的激励输入方向刚好相反,即全桥的动力输入采用图 5 所示的合成运动.

图 9 分别给出了工况 A 和工况 B 时,断层相应于桥梁的位置,以及相应的断层水平地震动方向.

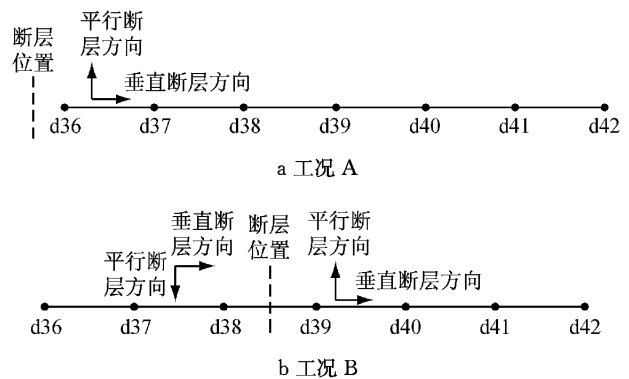


图 9 断层相应于桥梁结构的位置

Fig.9 Location of fault with respect to structure

3 分析结果

模型采用非一致激励的非线性时程法进行分析,用 Newton-Raphson 法进行迭代控制,迭代收敛误差 $\leq 10^{-4}$,为了保证计算结果误差较小,时间步长取 0.005 s. 分析时,将相应的垂直断层方向、平行断层方向和竖向 3 个位移时程波同时对各墩墩底输入进行计算. 给出了上部结构、支座的位移,桥墩墩顶相对墩底位移(简称墩顶相对位移)和墩底弯矩、扭矩. 其中,位移均指绝对位移值.

3.1 工况 A 下的桥梁响应

计算出的主梁跨中地震响应,如表 2 所示. 桥墩的地震响应如表 3 所示. 从表 3 可以看出,在纵向方向,采用不同类型支座对桥梁位移影响非常大. 如采用盆式支座时,d37 号桥墩墩顶相对位移最大,达 0.589 m;而采用铅芯支座时,d36 号桥墩位移反应最大,仅为-0.075 m;横向方向上桥墩相对位移略有差异. 采用铅芯橡胶支座后,桥墩墩底弯矩和扭矩普遍比盆式支座系统下的要小很多,表明铅芯橡胶支座在隔震耗能上起到了作用. 需要说明的是:以下各表数据中负号表示相反的方向.

表 2 跨中最不利弯矩和位移

Tab.2 Most unfavorable bending moments and displacement at the midspan of two bearing systems

位置	盆式橡胶支座			铅芯橡胶支座		
	竖向弯矩/(kN·m)	竖向位移/m	横向位移/m	竖向弯矩/(kN·m)	竖向位移/m	横向位移/m
第 2 跨跨中	1.523×10^5	0.768	0.352	9.992×10^4	0.740	0.248
第 3 跨跨中	1.438×10^5	0.752	-0.324	9.469×10^4	0.732	-0.265
第 4 跨跨中	1.232×10^5	0.747	0.282	6.547×10^4	0.741	-0.165
第 5 跨跨中	1.008×10^5	0.743	0.250	7.138×10^4	0.748	0.162

表 3 各墩的墩底最不利弯矩、扭矩及墩顶位移

Tab.3 Most unfavorable bending moments and torques at the bottom of piers and displacement at the top of piers of two bearing systems

支座类型	桥墩编号	纵向最不利		横向最不利		墩底扭矩/(kN·m)
		墩底弯矩/(kN·m)	墩顶相对位移/m	墩底弯矩/(kN·m)	墩顶相对位移/m	
盆式橡胶支座	d36	8.433×10^4	-0.270	-2.036×10^5	-0.190	-2.186×10^4
	d37	1.979×10^5	0.589	1.921×10^5	-0.117	-2.279×10^4
	d38	2.624×10^5	-0.162	2.363×10^5	0.102	-3.573×10^4
	d39	-3.890×10^5	-0.206	-2.312×10^5	0.081	3.739×10^4
	d40	1.270×10^5	0.191	-2.031×10^5	-0.088	-1.309×10^4
	d41	-1.435×10^5	-0.188	1.928×10^5	0.076	-1.751×10^4
	d42	1.119×10^5	0.132	-1.208×10^5	-0.044	-3.081×10^4
铅芯橡胶支座	d36	1.348×10^5	-0.075	-1.264×10^5	-0.076	-9.978×10^3
	d37	1.453×10^5	0.064	1.150×10^5	0.067	1.079×10^4
	d38	2.340×10^5	-0.044	-1.649×10^5	-0.046	-1.195×10^4
	d39	2.384×10^5	-0.035	-1.393×10^5	-0.038	-6.955×10^3
	d40	1.080×10^5	-0.030	9.963×10^4	0.035	-6.355×10^3
	d41	1.042×10^5	-0.033	-9.539×10^4	-0.036	7.584×10^3
	d42	1.045×10^5	0.031	1.085×10^5	0.039	8.205×10^3

表 4 仅给出 d37~d41 号桥墩上两种不同类型支座的相关最不利位移,对于盆式支座,由于约束条件的限制,仅给出各墩顶活动支座的纵向位移;对于铅芯橡胶支座,则分别给出各墩顶前后两支座的纵向和横向最不利位移. 需要说明的是,此处的支座位移是指支座顶板相对于底板的位移,也即是指桥梁上部结构相对于墩顶的位移. 从表上位移可以看出,活动支座的最大纵向位移发生在 d37 号桥墩处,为-0.648 m;铅芯橡胶支座的纵向最大位移发生在 d38 号桥墩处,为 0.681 m,且横向位移为-0.273 m.

表 4 最不利支座位移

Tab.4 Most unfavorable bearing displacement of two bearing systems

位置	活动支座纵向位移	铅芯支座			
		前		后	
		纵向位移	横向位移	纵向位移	横向位移
d37	-0.648	0.53	-0.292	-0.221	-0.271
d38	-0.344	0.681	-0.273	0.372	-0.243
d39	-0.364	0.411	-0.251	0.433	-0.230
d40	-0.203	0.297	-0.239	0.370	-0.235
d41	0.213	0.387	-0.231	0.333	-0.250

注:表中“前”和“后”表示墩顶铅芯支座的相对位置.

图 10a 和 b 分别给出了在工况 A 情形下铅芯橡

胶支座隔震体系下 d38 号墩墩顶、梁端和支座纵横向位移时程。图 11a, b 和 c 分别给出了铅芯橡胶支座的工作轨迹和相应的滞回曲线。其余各墩的时程响应均相似,为简洁起见不再给出。值得注意的是工况 A 代表了一般传统设计,假设桥位于断层一侧,忽略了断层的跨越效应。

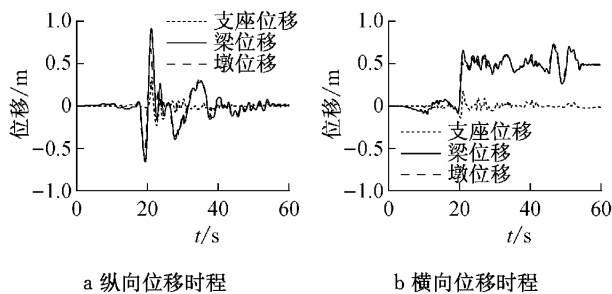


图 10 工况 A 下铅芯橡胶支座体系 d38 号桥墩墩顶、梁端和支座的纵横向位移时程

Fig. 10 Time histories of longitudinal and transverse displacement computed at deck, pier top and isolation system at d38 of lead bearings in case A

对位移时程的研究表明,墩顶和梁端的响应与

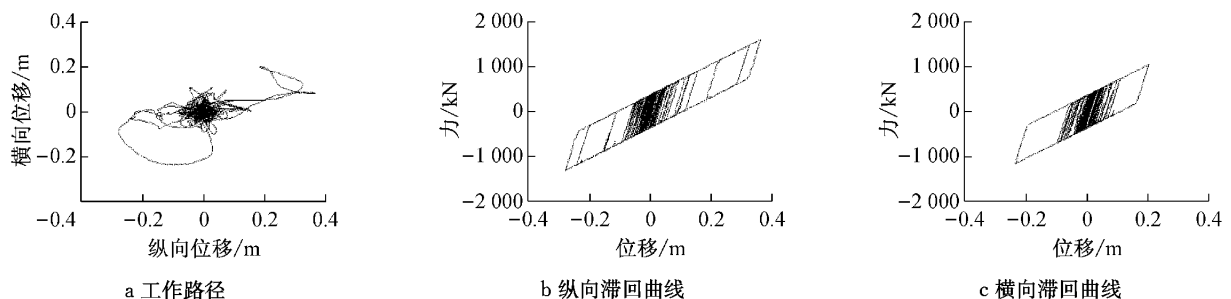


图 11 工况 A 下 d38 号桥墩处铅芯支座的工作路径和纵横向滞回曲线

Fig. 11 Displacement path and longitudinal and transverse force-displacement hysteresis loops of isolation system at d38 of lead bearings in case A

表 5 两支座体系下各跨中最不利弯矩和位移

Tab.5 Most unfavorable bending moments and displacement at midspan of two bearing systems

位置	盆式橡胶支座			铅芯橡胶支座		
	竖向弯矩/(kN·m)	竖向位移/m	横向位移/m	竖向弯矩/(kN·m)	竖向位移/m	横向位移/m
第 2 跨跨中	-7.494×10^4	0.659	-0.295	-1.006×10^5	0.730	0.248
第 3 跨跨中	9.562×10^4	-0.121	-0.288	-9.557×10^4	-0.039	-0.269
第 4 跨跨中	1.450×10^5	-0.672	0.285	7.556×10^4	-0.738	-0.164
第 5 跨跨中	1.613×10^5	-0.794	-0.324	8.084×10^4	-0.753	-0.180

作为比较,表 7 分别给出相应于表 4 的最不利支座位移。从表上位移可以看出,活动支座的最大纵向位移发生在 d37 号桥墩处,为-0.697 m;而铅芯橡胶支座纵向最大位移发生在 d38 号桥墩处,为 0.682 m,横向最不利位移发生在 d38 和 d39 号桥墩处,分别为-0.673 m 和 0.663 m。比较表 4 和表 7,

输入的位移时程非常相似。在平行断层方向,断层发生永久的错位,梁和墩顶之间的相对位移与地面位移相比相对较小。

3.2 工况 B 下的桥梁响应

表 5 给出了主梁的跨中地震响应。比较表 2 和表 5,会发现在断层跨越跨竖向位移明显比其他跨要小,采用铅芯橡胶支座下的跨中竖向弯矩普遍会大幅度地降低。表 6 则给出两种类型支座下,各墩的墩底最不利弯矩、扭矩及墩顶相对位移。从表中可以看出,两支系统系统在纵向方向上对桥梁响应的影响存在很大差别,墩底扭矩均是在 d38 和 d39 号桥墩处突然增大。比较表 3 和表 6,纵向方向上,A,B 工况下的响应彼此相似,横向方向上,d38 和 d39 号桥墩墩底扭矩明显在工况 A 下的响应要比工况 B 下的响应高数倍。两种工况下采用盆式支座时 d38 和 d39 号桥墩墩底的扭矩也比采用铅芯橡胶支座时的扭矩要高,故在跨断层的桥墩墩底设计时须考虑扭矩的作用,避免因扭矩过大造成桥墩扭转开裂破坏。值得注意的是,表 4 和表 7 给出支座位移方向上存在差异,这是由断层错位引起的。

在 d38 和 d39 号桥墩处,工况 A 下,活动支座的位移分别为-0.344 m 和-0.364 m,而工况 B 下,活动支座的纵向位移为-0.357 和 0.409,方向相反,工程上就需考虑方向位移可能带来的梁体碰撞;采用铅芯支座时,工况 B 下支座横向位移在跨断层桥墩处(d38 和 d39)为-0.673 m 和 0.663 m,与工况 A

表 6 两支座体系下各墩的墩底最不利弯矩、扭矩及墩顶相对位移
Tab.6 Most unfavorable bending moments and torques at the bottom of piers and displacements at the top of piers of two bearing systems

支座类型	桥墩编号	纵向最不利		横向最不利		墩底扭矩/(kN·m)
		墩底弯矩/(kN·m)	墩顶相对位移/m	墩底弯矩/(kN·m)	墩顶相对位移/m	
盆式橡胶支座	d36	9.043×10^4	-0.266	2.492×10^5	0.214	-3.526×10^4
	d37	1.918×10^5	0.577	1.851×10^5	0.117	-4.540×10^4
	d38	-4.181×10^5	-0.221	-6.925×10^5	-0.298	-2.368×10^5
	d39	-5.349×10^5	-0.252	6.579×10^5	0.254	-2.332×10^5
	d40	-1.201×10^5	0.178	-2.149×10^5	-0.100	-3.560×10^4
	d41	-1.402×10^5	-0.185	-2.164×10^5	-0.096	2.083×10^4
铅芯橡胶支座	d42	-1.093×10^5	-0.127	-1.196×10^5	-0.047	2.954×10^4
	d36	1.336×10^5	-0.079	-1.316×10^5	-0.080	-1.792×10^4
	d37	1.430×10^5	0.064	1.126×10^5	0.068	-1.743×10^4
	d38	-2.171×10^5	-0.055	-2.002×10^5	-0.058	-3.397×10^4
	d39	2.154×10^5	0.052	1.810×10^5	0.053	-3.387×10^4
	d40	-1.045×10^5	-0.029	9.912×10^4	0.029	-1.412×10^4
	d41	-1.065×10^5	-0.027	8.759×10^4	0.030	-9.776×10^3
	d42	1.044×10^5	0.034	1.015×10^5	0.040	-9.065×10^3

的结果-0.243 m和-0.251 m相比大了数倍,需要格外注意反向大位移可能带来的落梁,工程上需在桥墩上考虑一定的搭接长度。

表 7 两支座体系的相关最不利支座位移
Tab.7 Most unfavorable bearing displacement at the top of piers of two bearing systems m

位置	活动支座纵向位移	铅芯支座			
		前		后	
		纵向位移	横向位移	纵向位移	横向位移
d37	-0.697	0.531	-0.303	-0.216	-0.252
d38	-0.357	0.682	-0.290	0.371	-0.673
d39	0.409	0.407	0.663	0.434	0.262
d40	0.212	0.295	0.218	0.372	0.240
d41	-0.218	0.388	0.221	0.339	0.226

注:表中“前”和“后”表示墩顶铅芯支座的相对位置。

图 12 给出了工况 B 采用铅芯支座情形下,d38 和 d39 号桥墩处梁、墩顶和铅芯支座的位移时程响应。d38 和 d39 号桥墩分别位于断层的左侧和右侧。与工况 A 所不同的是,工况 B 需考虑断层两侧的位移差,这一点在设计中通常被忽略,工程师仅仅利用一些近断层的激励,来进行工况 A 的分析,从而取得设计位移。图 13 给出 d38 和 d39 号桥墩处支座的力与位移滞回曲线。

将图 10 和图 12 进行比较,会发现当考虑断层跨越效应时,计算的响应完全不同。断层两侧墩顶位移时程与其输入位移时程相似。然而,工况 B 中所计算的墩顶位移总是比梁端位移要大许多。铅芯橡胶支座的变形也明显比工况 A 要大许多。当考虑断层跨越效应时,断层两侧的隔震系统向两个完全不同的方向运动。图 12 中还需注意的是,尽管桥墩上的铅芯橡胶支座横向位移很大,但梁端位移偏移得相

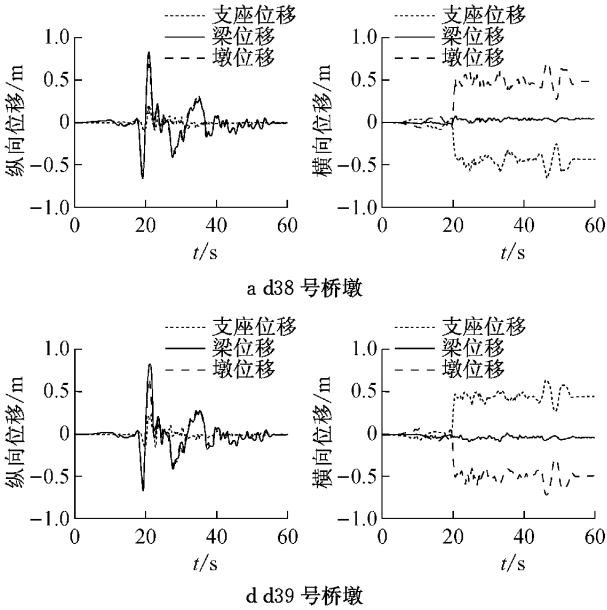


图 12 工况 B 情形下 d38 和 d39 桥墩位置处梁、墩顶和铅芯支座的位移时程响应

Fig. 12 Time histories of displacement computed at deck, pier top and isolation system at piers 38 and 39 for case B

当有限,这也说明隔震支座起到了保持桥梁线性的作用。比较图 11 和图 13 两幅图的支座力与位移滞回曲线,在跨断层工况 B 作用下,隔震支座在地震中横向耗能有限,在纵向则尽可能减少方向性脉冲对结构带来的影响。从其位移轨迹图和力与位移滞回曲线来看,应设置相应的措施来防止落梁。

4 结论

利用 Mayssa Dabaghi 等^[9]提出的脉冲模型和

太平洋地震工程研究中心的强地震数据库,生成了该桥跨断层位置的模拟跨断层地震动.采用生成的模拟跨断层地震动,对该跨断层简支梁桥进行了一系列的分析,量化其响应,并对采用两种不同类型支座时的桥梁响应进行了评估比较,得出以下结论:

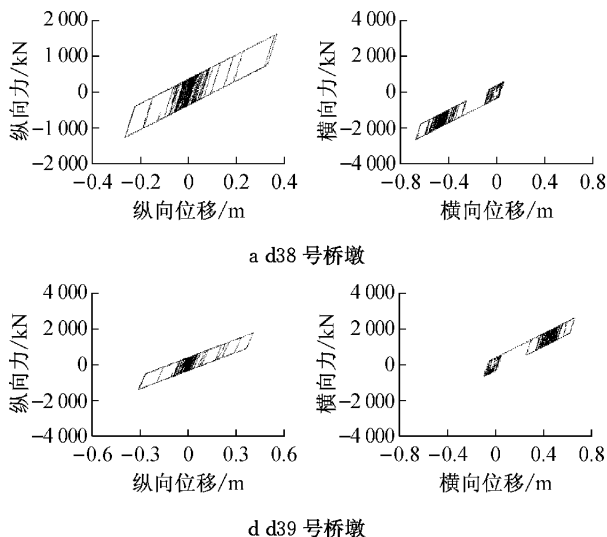


图 13 工况 B 情形下 d38 和 d39 桥墩位置处隔震支座位移与位移滞回曲线

Fig. 13 Force-displacement hysteresis loops for seismic bearings at piers 38 and 39 for case B

(1)如果不考虑断层错位的影响,可能会低估桥梁结构的响应需求,如墩底截面受力和支座位移,工况 B 与工况 A 相比较可以发现,紧邻断层的桥墩墩底截面弯矩与扭矩明显比其他墩墩底截面弯矩与扭矩要大许多,且墩顶处横向支座位移是其他墩顶处支座位移的数倍.

(2)此外,工况 B 下,紧邻断层的桥墩处活动支座的纵向位移分别为 -0.36 和 0.41 ,方向相反,工程上就需考虑方向位移可能带来的梁体碰撞;采用铅芯支座时,工况 B 下支座横向位移在跨断层桥墩处(d38 和 d39)为 -0.67 m 和 0.66 m,与工况 A 的结果 -0.24 m 和 -0.25 m 相比大了数倍,需要格外注意反向大位移可能带来的落梁,在实际工程中需要对跨断层桥梁考虑一些额外的防落梁和碰撞措施.

(3)从 A, B 两种工况来看,采用铅芯支座时的桥梁响应均比采用普通盆式支座的桥梁响应要低;且在工况 B 下,采用铅芯支座时,跨断层处发生的梁端位移很小,可见隔震支座很好地起到了保持桥梁线性的作用;对于跨中截面的响应,工况 B 中断层跨越跨竖向位移响应明显比工况 A 中所对应位置的竖向位移响应小很多.

这些研究结果有助于更好地理解隔震桥梁跨越断层断裂区域时的反应.在如今缺乏对跨断层桥梁分析和设计指南的情况下,本研究可起到一定的参考作用.

参考文献:

- [1] Makris N, Chang Shih-po. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29: 85.
- [2] Somerville P G. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 137: 201.
- [3] Abrahamson N A. Incorporating effects of near-fault tectonic deformation into design ground motions [EB/OL]. [2014-05-08]. <http://civil.eng.buffalo.edu/webcast/abrahamson/presentation.html>.
- [4] Goel R K, Chopra A K. Analysis of ordinary bridges crossing fault-rupture zones [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2008.
- [5] Dreger D, Hurtado G, Chopra A, *et al.* Near-fault seismic ground motions [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2007.
- [6] 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 and Structural Dynamics*, 2004, 33:1249.
- [7] Ucak A, Mavroeidis G P, Tsopelas P. Assessment of fault crossing effects on a seismically isolated multi-span bridge[C/OL]// 15 WCEE, Lisboa, 2012 [2014-05-08]. <http://www.docin.com/p-830730022.html>.
- [8] Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93:1099.
- [9] Dabaghi M, Kiureghian D A. Stochastic model and simulation of near fault ground motions for specified earthquake source and site characteristics[R]. Berkeley: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2011.
- [10] Vaez S R H, Sharbatdar M K, Amiri G G, *et al.* Dominant pulse simulation of near fault ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12: 267.
- [11] Somerville P, Irikura K, Graves R, *et al.* Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion[J]. *Seismological Research Letters*, 1999, 70 (1): 59.
- [12] Goel R, QU Bing, Rodriguez O, *et al.* Bridge design for earthquake fault crossing: Synthesis of design issues and strategies [R]. San Luis Obispo: Department of Civil & Environmental Engineering California Polytechnic State University, 2012.