

石岩,王文仙,赵昊森,等. 2024. 跨走滑断层多跨筒支梁桥地震反应特征与参数分析[J]. 地震研究, 47(3): 461-473, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0048.

Shi Y, Wang W X, Zhao H M, et al. 2024. Seismic response characteristics and parameter analysis of the multi-span simply supported girder bridge across strike-slip faults[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(3): 461-473, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0048.

跨走滑断层多跨筒支梁桥地震反应特征与参数分析*

石岩,王文仙*,赵昊森,杨雄,柴文阳

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为揭示跨走滑断层多跨筒支梁桥的地震响应规律,以1座4跨筒支梁桥为研究对象,基于OpenSees建立了3维动力弹塑性分析模型;采用“分解-叠加”法合成40组跨断层地震动,以多点激励的方式输入到建立的动力分析模型,进行非线性动力时程分析,研究了跨走滑断层多跨筒支梁桥在地震动作用下的地震反应特征,分析了断层的穿越角度和穿越位置对跨走滑断层多跨筒支梁桥地震响应的影响。结果表明:地震动作用下跨走滑断层桥梁结构会发生剧烈的位移反应;断层穿越角度和穿越位置对桥梁地震反应有显著的影响;地震动作用下跨断层筒支梁桥的扭转效应不可忽视。

关键词: 跨断层地震动;多跨筒支梁桥;地震响应;地震损伤;参数分析

中图分类号: U448.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)03-0461-13

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0048

0 引言

近年来,我国交通网络进一步完善,交通基础设施建设不断向西部地区推进,桥梁建设时临近或跨越断层的情况不可避免(宗周红等,2023)。历次地震的震害表明跨断层桥梁往往会发生更严重的破坏,如1999年中国台湾集集7.6级地震、2008年四川汶川8.0级地震以及1999年土耳其科贾埃利7.4级地震中跨越断层的桥梁轻则遭遇局部损伤,重则发生落梁甚至倒塌破坏(Yang, Mavroeidis, 2018; 贾宏宇等, 2021)。随着跨断层桥梁数量的逐渐增大,其地震损伤问题日渐突出。

地震作用下跨越活动断层的桥梁比非跨越断层桥梁具有更复杂的受力特点、破坏形式和破坏机理(贾宏宇等, 2021; 宗周红等, 2023)。随着人们对跨断层地震动认识的逐渐深入以及数值

模拟技术的发展,一些学者探索了桥梁结构反应和跨断层地震动特性之间的关系。1999年土耳其迪兹杰发生7.2级地震,其中位于土耳其西部跨越走滑断层的Bolu高架桥发生了严重破坏,此后诸多学者对Bolu高架桥等结构进行了近断层地震反应分析(Park et al, 2004),指出了减隔震桥梁在近断层地震动作用下的位移反应和设计要求,并对近断层地震动的模拟和选取提出了建议(石岩等, 2017; Yang et al, 2017; Ucak et al, 2014)。随着我国首座跨断层桥梁海文跨海大桥的设计和修建(刘新华等, 2020),跨断层桥梁的抗震问题也受到了诸多国内学者的关注。江辉等(2020, 2021)讨论了不同地震动强度下跨断层高铁筒支梁桥的地震安全性以及跨断层筒支钢箱梁桥墩的概率性地震损伤特性;高健峰等(2021)对比分析了3种不同的减隔震支座对跨断层桥梁横向地震响应的影响;曾聪等(2021)研究了断层跨越角度、断层永久位移以及断层最

* 收稿日期: 2023-06-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52268075); 甘肃省重点研发计划(22YF7GA161); 陇原青年创新创业人才(团队)项目(20230201).

第一作者简介: 石岩(1985-), 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震及损伤控制研究. E-mail: syky86@163.com.

通信作者简介: 王文仙(1999-), 硕士研究生在读, 主要从事桥梁抗震研究. E-mail: wangwx103@163.com.

大位移对深水独塔斜拉桥非线性地震响应的影响；张凡等（2022）以海文大桥跨断层引桥为研究对象，分析了永久位移地震动频带、断层相对位置、竖向地震动及减隔震措施对该桥地震反应的影响规律；Jia 等（2024）通过建立轨道-桥梁-桩-土耦合系统的精细化有限元模型，研究了跨走滑断层大跨度铁路悬索桥的轨道-桥梁变形关系和相互作用。在我国建成的桥梁中，简支梁桥由于设计、施工和养护等方面的优势，占比最高，其结构形式以多联多跨简支梁桥最为普遍。因此讨论跨断层多跨简支梁桥在地震动下的抗震性能、结构损伤程度及设计防护措施是最重要的桥梁抗震问题之一。

为揭示跨走滑断层多跨简支梁桥的地震响应规律，本文采用“分解-叠加”的方法合成了分别考虑向前方向性效应和滑冲效应的 40 组跨断层地震动。以 1 座 4 跨简支梁桥为研究对象，将合成地震动采用多点激励位移输入动力分析模型并进行非线性时程分析，研究了桥墩、支座、主梁等关键构件在跨走滑断层地震动作用下的地震反应。通过改变断层穿越角度和断层穿越位置，分析了其对跨走滑断层多跨简支梁桥地震响应的影响。

1 跨断层地震动模拟

跨断层地震动本质上属于一种特殊的近断层

$$v(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi f_p}{\gamma} (t - t_0) \right] \right\} \cos \left[2\pi f_p (t - t_0) + \varphi \right] & \left(t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \right) \leq t \leq \left(t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \right) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $v(t)$ 为合成速度脉冲； A 表示低频速度脉冲峰值； f_p 表示低频速度脉冲频率； φ 表示低频速度脉冲相位； γ 是低频速度脉冲形状参数； t_0 表示低频速度脉冲峰值出现的时刻。其中低频速度脉冲峰值 A 的确定与地震动强度有关；低频速度脉冲频率 f_p 的确定与震级 M 有关（Halldórsson *et al*, 2011；Cork *et al*, 2016）。合成低频脉冲时，震级根据实测地震动的震级进行取值。脉冲模型参数是基于大量实测地震动统计得到的，具有一般性，但其局限性在于缺少对地壳传播介质不均匀性、局部场地效应、震源复杂性等特殊性的考虑（宗周红等，2023）。模拟时分别考虑了走滑断层在垂

地震动，而近断层地震动是低频脉冲和高频成分高度耦合的随机过程。为兼顾两者对结构地震反应的影响，本文采用“分解-叠加”法对跨断层地震动进行模拟（李帅等，2017）。具体步骤为：①选取实测地震动记录并进行滤波处理以获得高频分量；②根据 Mavroeidis 模型生成低频速度脉冲（Mavroeidis, Papageorgiou, 2003）；③叠加高频分量和低频速度脉冲分量，构造跨断层地震动。

1.1 高频地震动分量提取

选取 Baker 等（2011）推荐的 40 组脉冲型近断层地震动作为原始地震动，并依次编号为 PL-01~40。采用 4 阶 Butterworth 滤波方法将 40 组近断层地震动进行分解以得到高频分量。滤波时采用的截止频率依据 Li 等（2017）给出的公式进行计算：

$$f_c = \frac{1}{\alpha T_p - dt} \quad (1)$$

式中： f_c 为滤波截止频率； dt 表示原始地震动的记录步长； T_p 为脉冲周期； α 为经验系数，滑冲效应地震动取 $\alpha = 0.25$ （Ghahari *et al*, 2010），向前方向性效应地震动取 $\alpha = 0.8$ （Li *et al*, 2017）。

1.2 低频速度脉冲生成

走滑断层低频速度脉冲采用 Mavroeidis 提出的速度脉冲模型进行模拟（Mavroeidis, Papageorgiou, 2003；Yang *et al*, 2020），其表达式为：

直于断层（Fault - Normal, FN）方向的向前方向性效应和平行于断层（Fault - Parallel, FP）方向的滑冲效应。这两个方向的低频速度脉冲如图 1 所示。

1.3 地震动合成及输入

根据田玉基等（2007）的研究，可以近似认为低频脉冲加速度峰值的到达时刻与高频脉冲加速度峰值的到达时刻相同，因此将震级相同的高频加速度时程与低频加速度时程叠加在一起，得到不同震级的合成地震动模拟时程。通过积分就可得到跨断层脉冲型地震动的位移时程。不同震级下跨断层脉冲型地震动的位移时程如图 2 所示。

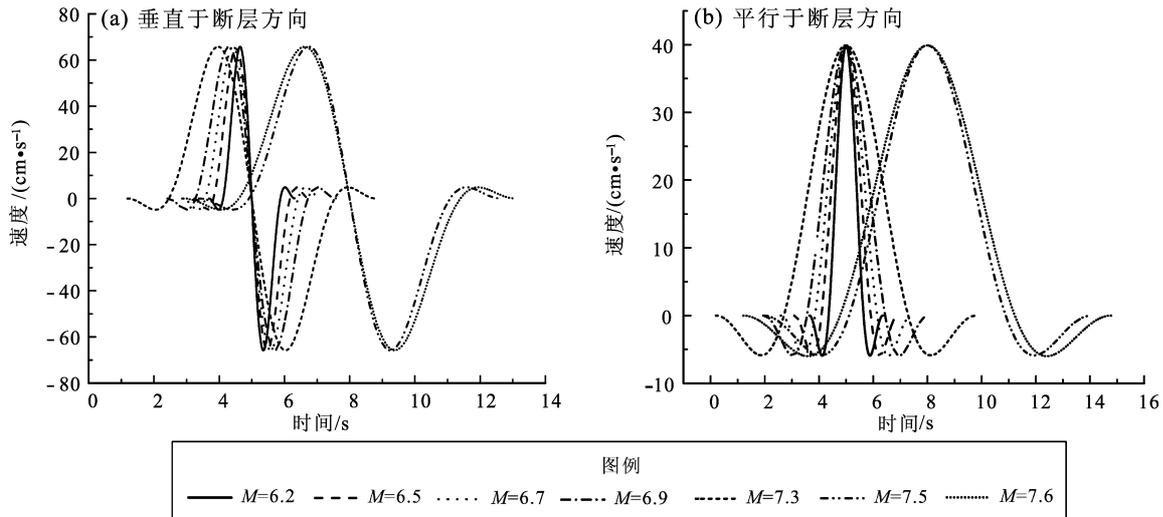


图1 人工合成低频速度脉冲

Fig. 1 Artificially synthesized low-frequency velocity pulses

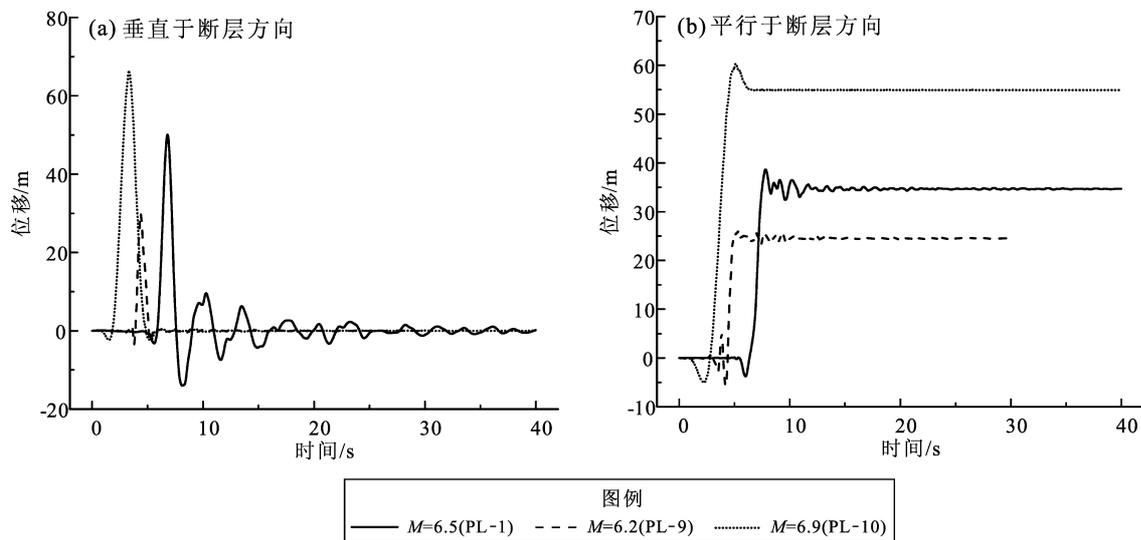


图2 合成地震动的位移时程曲线

Fig. 2 Displacement time history curve of synthetic ground motions

跨断层地震动具有显著的空间变异性。加载跨走滑断层地震动时，考虑到平行于断层方向的非一致地面运动及永久地面位移，需要将模拟合成的位移时程作为断层两侧桥墩的地震动并采用多点激励位移输入（田玉基，杨庆山，2005）。对于断层两侧桥墩，在平行于断层方向采用大小相同、方向相反的地震动位移时程，以模拟断层相对错动。在垂直于断层方向上的地面运动具有连续性，地震动输入方式为空间非一致激励。图3为跨断层桥梁地震动输入平面示意图， $G_{FP}(t)$ 和 $G_{FN}(t)$ 分别表示断层两侧FP分量和FN分量的地震动

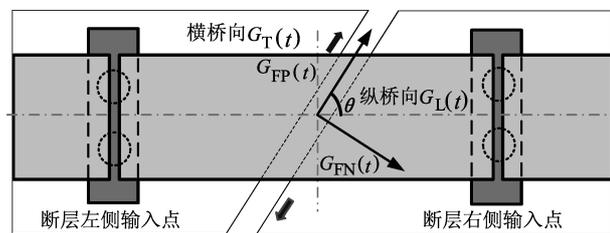


图3 跨断层桥梁地震动输入转换方法示意图

Fig. 3 Diagram of input conversion method for cross-fault ground motions

时程； θ 为桥梁轴向与断层的夹角，并以逆时针旋转为正。进行动力计算时将断层两侧FN分量和FP

分量的地震动时程转换为纵桥向 $G_L(t)$ 和横桥向 $G_T(t)$ 地震动时程进行输入。在纵桥向, 断层两侧地震动激励相同, 在横桥向, 断层两侧地震动激励则采用“等幅反向”的方法(惠迎新等, 2015)。

2 多跨简支梁桥有限元模型

2.1 桥梁概况

本文研究对象为我国西南地区的 1 座 4 跨简支梁桥。如图 4 所示, 全桥长 100 m, 桥跨布置为 4×25 m, 桥宽 8 m。桥梁的上部结构采用梁长为 25 m 的预应力混凝土空心板梁, 每跨(编号 1#、2#、

3#、4#) 上部结构由 8 片板梁组成, 板梁横向之间设置铰缝。下部结构为单柱直径 1.5 m 的圆截面双柱式混凝土排架墩(编号 1#、2#、3#) 和两个重力式桥台(编号 0#、4#)。双柱式桥墩混凝土强度为 C30, 墩顶设有盖梁和挡块, 桥墩中间位置和墩底分别设有系梁和地系梁, 桥台为 U 型重力式桥台。支座均采用冠状板式橡胶支座, 全桥共计 128 个, 且所有支座上下表面均直接采用环氧树脂粘接在主梁的底部和盖梁(台帽) 顶面。桥址处地基土主要为: 填充土(FS)、强风化砂岩(SWS)、中砂(SM)、松散卵石土(LGS)、全风化砂岩(CWS)、中风化砂岩(MWS)。

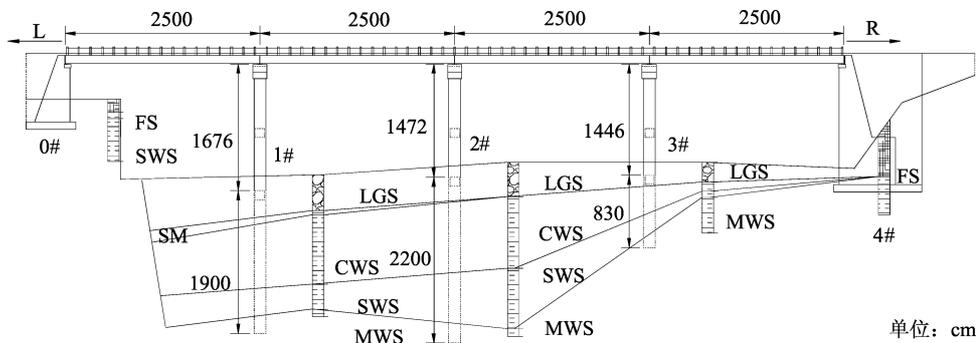


图 4 背景桥梁工程概况

Fig. 4 Background bridge engineering profile

2.2 有限元模型

基于 OpenSees 有限元平台建立了桥梁的三维数值模型, 如图 5 所示。桥梁结构的阻尼比取 5%, 并采用 Reyleigh 阻尼。桥梁的上部结构采用梁格法建立模型, 考虑到该类型桥梁的上部结构在地震中很少出现塑性变形, 故混凝土板梁和梁间的横向联系均采用弹性梁单元模拟, 横向联系每隔 5 m 设置一道, 且只考虑刚度不考虑质量。针对双柱式排架墩的非线性力学特性, 其盖梁直接采用弹性梁单元模拟, 墩柱和系梁均采用基于纤维截面的非线性梁单元模拟(石岩等, 2021)。挡块的模拟采用基于试验研究提出的钢筋混凝土挡块发生斜截面剪切破坏的力学简化模型(Silva *et al*, 2009; 徐略勤, 李建中, 2006)。纤维截面混凝土采用 Concrete04 材料, 钢筋采用 Steel02 材料。冠状板式橡胶支座利用基于双折线本构的 elastomericBearingPlasticity 单元模拟, 其竖向刚度 K_{bc} 、屈服力

F_{cr} 和剪切刚度 K_{bs} 计算公式如下:

$$K_{bc} = \frac{nE_e A_r}{\sum t} \quad (3)$$

$$K_{bs} = \frac{nG_e A_r}{\sum t} \quad (4)$$

$$F_{cr} = \mu R \quad (5)$$

式中: E_e 、 A_r 和 $\sum t$ 分别为板式橡胶支座的抗压弹性模量、面积和橡胶层总厚度, 按照《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T04—2019) 取值; n 为板式橡胶支座的个数; G_e 为橡胶支座的水平剪切模量, 其值按照《公路桥梁抗震设计规范》(JT/T 2231-01-2020) 取 $1\ 200\ \text{kN/m}^2$; μ 为支座与盖梁或台帽接触面上的动摩擦系数, 取 0.27(项乃亮等, 2016); R 为竖向支座反力, 当板式橡胶支座在接触面发生滑动后, 其剪切刚度取为 0。

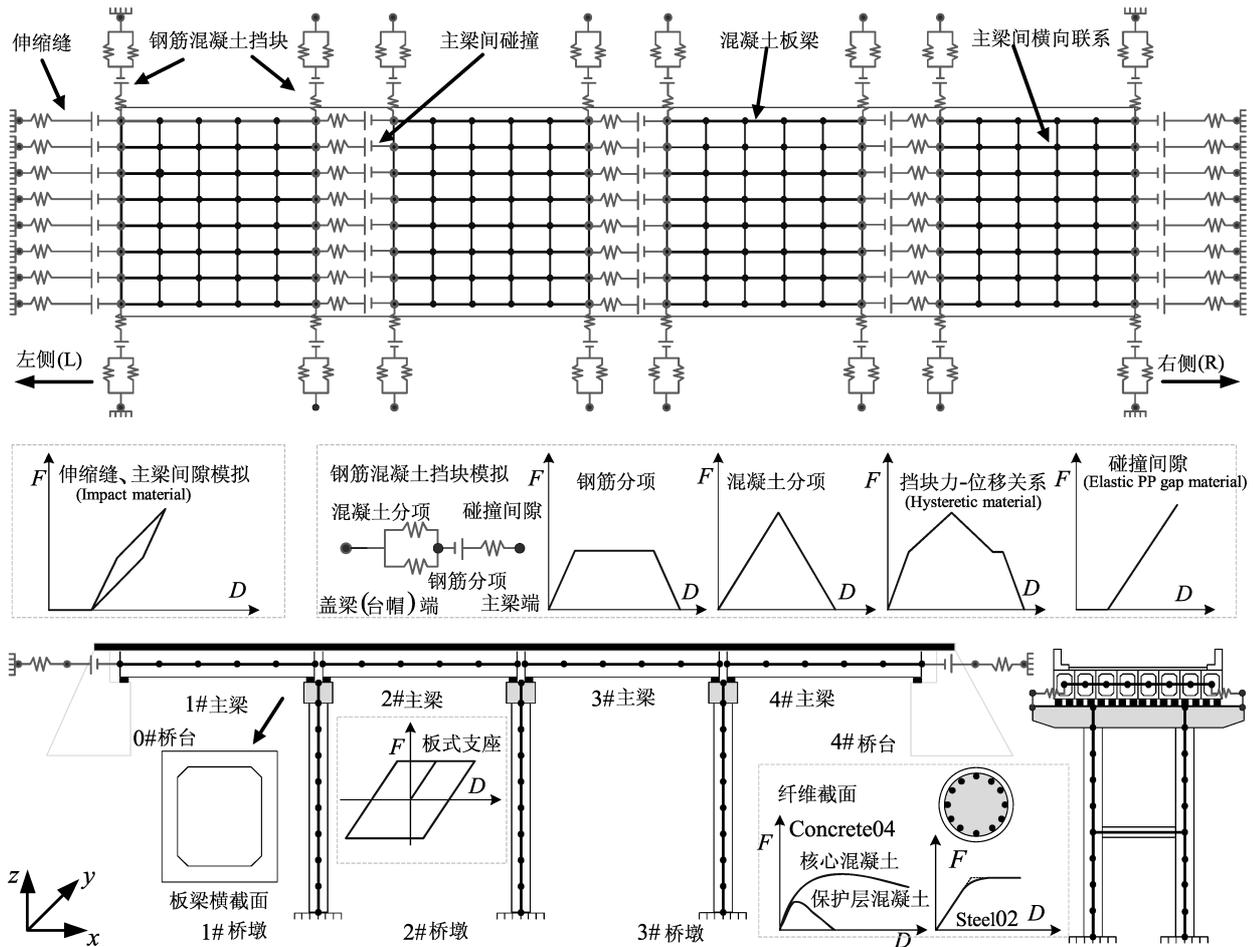


图5 基于 OpenSees 有限元平台建立的桥梁三维数值模型

Fig. 5 Three - dimensional numerical modeling of background engineering bridges based on the OpenSees finite element platform

3 地震反应及损伤

本文基于简支梁桥的数值模型，假定断层以 $\theta = 90^\circ$ 从桥梁第 1 跨穿过，对桥梁进行跨断层地震动作用下的时程分析。将相同震级的地震动响应求均值，以消除不确定性。选取地震动数量较多的震级进行分析，即通过分析桥墩、支座以及主梁在 $M = 6.5$ 、 6.7 和 7.6 时的位移响应，对跨断层地震动作用下多跨筒支梁桥的地震反应和损伤程度进行研究。

3.1 桥墩位移反应及损伤

钢筋混凝土结构或构件在地震作用下的破坏状态共划分为 5 个等级，分别是：无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤以及完全破坏 (FEMA, 1999)。以位移延性系数作为桥墩的损伤指标

(Hwang *et al*, 2001)，通过 Pushover 分析确定桥墩的位移延性损伤界限值。不同破坏状态下的桥墩损伤界限值见表 1。

表 1 根据位移延性系数定义的桥墩损伤状态

Tab. 1 Damage state of the pier defined by the displacement ductility ratio

损伤状态	纵桥向界限值	横桥向界限值
无损伤	$\mu_d \leq 1.0$	$\mu_d \leq 1.0$
轻微损伤	$1.0 < \mu_d \leq 1.20$	$1.0 < \mu_d \leq 1.35$
中等损伤	$1.2 < \mu_d \leq 1.76$	$1.35 < \mu_d \leq 2.47$
严重损伤	$1.76 < \mu_d \leq 4.76$	$2.47 < \mu_d \leq 5.48$
完全破坏	$\mu_d > 4.76$	$\mu_d > 5.48$

图 6 给出了 $M = 6.5$ 、 6.7 和 7.6 时，各个桥墩沿纵桥向和横桥向的墩顶位移峰值、位移延性系数和位移时程。从图中可以看出：各个桥墩沿

纵、横桥向的位移和位移延性系数均随着震级的增大而增大，如1#、2#和3#桥墩在 $M = 7.6$ 时的纵桥向峰值位移比 $M = 6.5$ 时分别增大了 5.4、5.3 和 5 倍，且纵桥向的位移和位移延性系数均远大于横桥向；当 $M = 6.5$ 时沿纵桥向1#和2#桥墩均为中等损伤，3#墩为严重损伤，而1#、2#、3#桥墩沿横桥向均处于轻微损伤状态。由 PL - 31 地震动作用下1#、2#和3#桥墩纵横向的位移

时程曲线（图 6c、d）也可以看出，纵桥向的墩顶峰值位移远大于横桥向，横桥向则表现出较大的残余位移，这是因为纵桥向输入的地震动分量具有显著的方向性效应，表现为较大的峰值位移，而横桥向输入的地震动分量具有显著的滑冲效应，表现为较大的残余位移。同时横桥向各个墩的残余位移相差较大，其中1#桥墩离断层最近，残余位移最大。

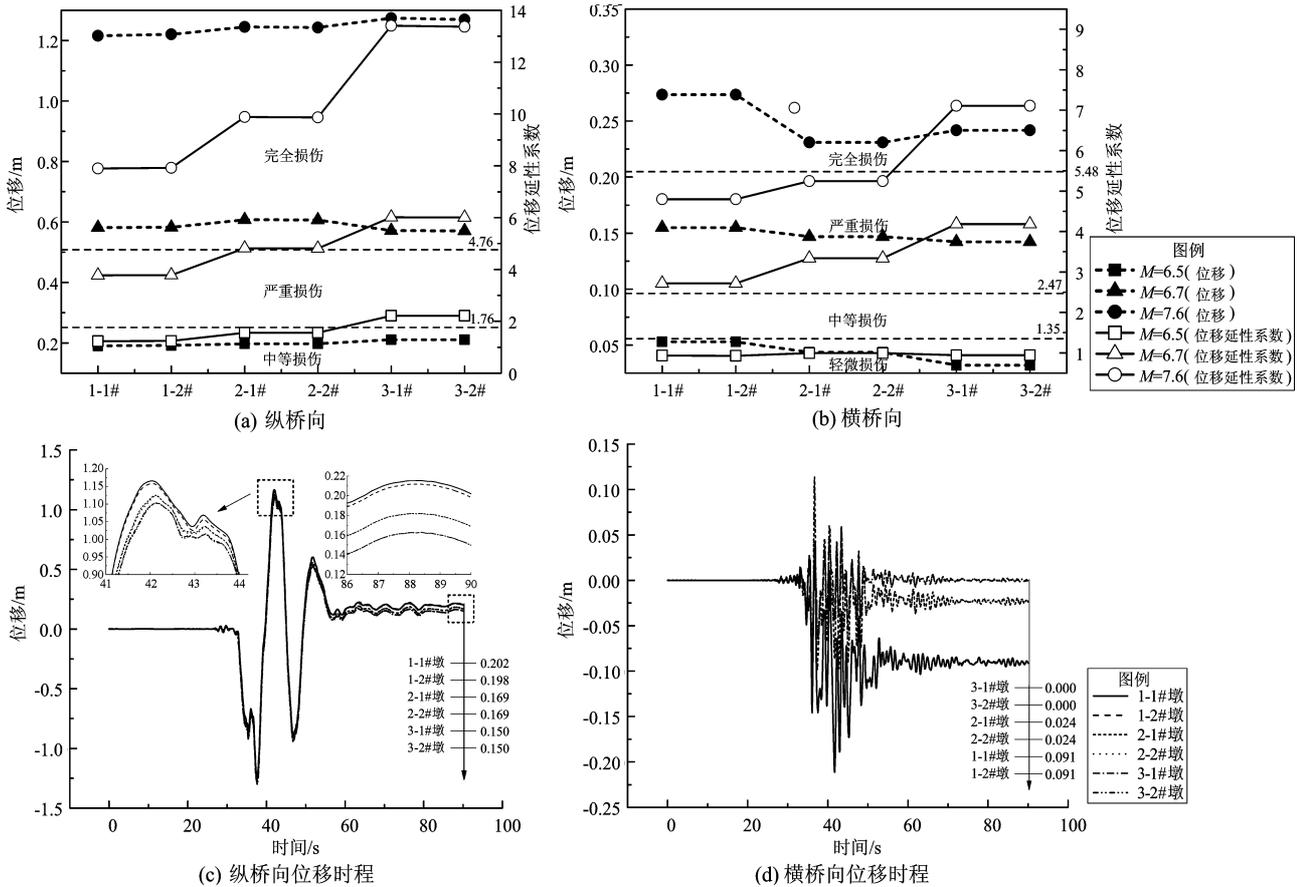


图 6 $M = 6.5$ 、 6.7 和 7.6 时，各桥墩沿纵桥、横桥向墩顶位移峰值、位移延性系数 (a、b) 和位移时程 (c、d)
 Fig. 6 Peak displacements, displacement ductility ratio (a, b), and displacement time history (c, d) along the longitudinal and transverse bridge directions for pier tops hit by $M6.5$, $M6.7$, $M7.6$ earthquakes

3.2 支座位移反应

图 7a、b 分别给出了 $M = 6.5$ 、 6.7 和 7.6 时桥台和桥墩处各个支座沿纵、横桥向的峰值位移均值。从图上可以看出，无论是纵桥向还是横桥向，在不同震级下桥台处支座位移反应均为最大。地震动作用下各处支座无论纵桥向还是横桥向位移均大于板式橡胶支座的滑动位移 (0.044 m)，表明支座纵横向均发生了滑动。相比于纵桥向，

由于混凝土挡块的限制，桥墩处支座横桥向的位移反应较小。当 $M = 7.6$ 时，桥台处支座纵桥向位移大于主梁在台帽的搭接长度 0.8 m ，横桥向位移大于单片主梁的宽度 1 m ，表明无论纵、横桥向，此时桥台处主梁均可能发生落梁，而 $M = 6.5$ 和 6.7 时，虽然位移反应还在界限值之下，但是剧烈的纵、横桥位移叠加之后依旧存在极高的落梁风险。图 7c 为 PL - 01 地震动作用下，1#主梁两端边

支座的纵、横桥向位移时程。由图可以看出，主梁同一侧两个边支座的横桥向峰值位移和残余位移相差明显。但0#桥台处支座横桥向位移反应明显大于1#桥墩处支座位移反应，与统计结果相符。主梁同一侧的两个支座，沿纵桥向时其位移

响应有一定差值，这表明断层穿越桥跨处，由于滑冲效应引起的主梁刚性旋转使支座存在扭转变形，从而导致同端两侧边支座位移并不相同，而支座横向位移反应没有明显差别，这可能是由于挡块和背墙的限制影响了支座横向位移的发展。

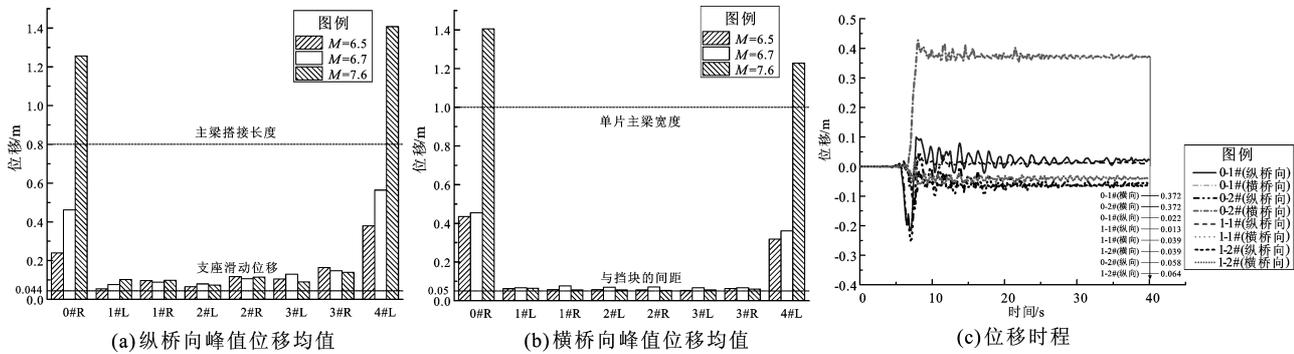


图7 不同震级下支座沿纵 (a)、横 (b) 桥向的峰值位移均值和位移时程 (c)

Fig. 7 Average of peak displacements along the longitudinal (a) and transverse (b) bridge directions and displacement time history (c) for bearings at different seismic magnitudes

3.3 主梁位移反应

图8分别给出了不同震级下1#、2#、3#、4#主梁两端的峰值位移和残余位移。从图8a可以看出，距离断层越近的主梁，其梁端纵桥向峰值位移值越大，且所有主梁在M=6.5时峰值位移最大，而距离断层较近的1#、2#和3#主梁在M=6.7时峰值位移最小，距离断层最远的4#主梁在M=

7.6时峰值位移最小。出现此规律的原因除了受到断层位置的影响，还与跨断层地震动横桥向滑冲效应和纵桥向向前方向效应的相互耦合相关，震级越大、横桥向滑冲位移和纵桥向峰值位移越大，则横桥向滑冲效应对纵桥向地震反应影响越明显，最终使得离断层较近的主梁位移响应规律异于离断层较远的主梁位移响应规律。纵桥向主梁的

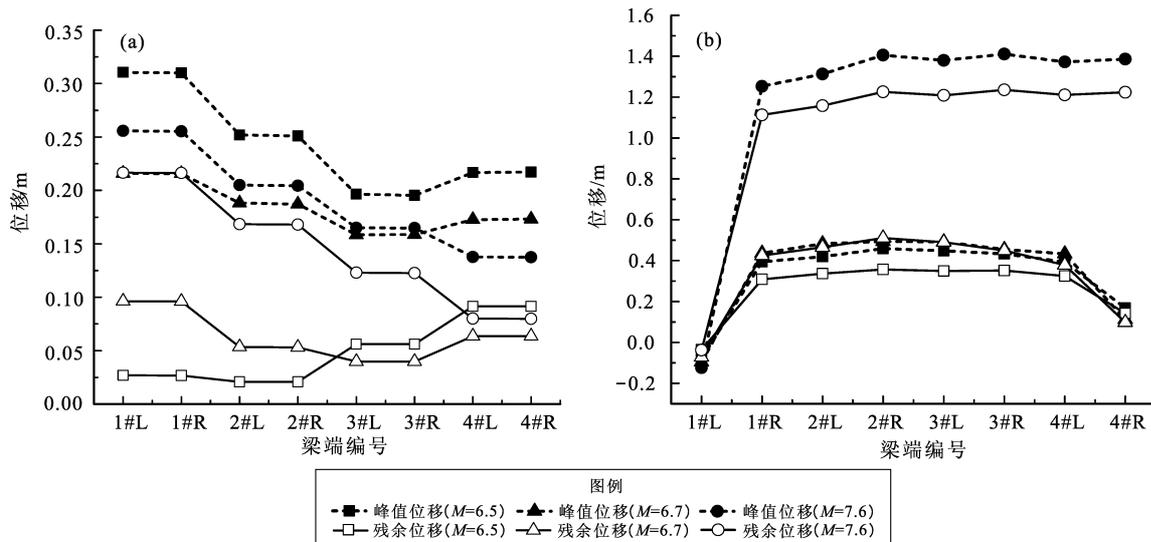


图8 不同震级下主梁沿纵 (a)、横 (b) 桥向的峰值位移和残余位移

Fig. 8 Peak and residual displacements along the longitudinal (a) and transverse (b) bridge directions for the ends of each girder at different earthquake magnitudes

残余位移规律更是印证了这一结论,由图 8a 可知,虽然 $M=6.5$ 时主梁有剧烈的峰值位移反应,但是主梁的残余位移远小于 $M=6.7$ 和 $M=7.6$,这说明 $M=6.5$ 时跨断层地震动对支座和桥墩的损伤较轻,结构体系的塑性变形较小,还说明 $M=6.5$ 时剧烈的纵向位移主要是由跨断层地震动向前方向性效应引起的。而 $M=7.6$ 时主梁的峰值位移反应与残余位移反应同样剧烈,这说明 $M=7.6$ 时纵桥向剧烈的地震动峰值位移对桥墩等造成了更严重的损伤,还表明 $M=7.6$ 时主梁的纵桥向位移受跨断层地震动滑冲效应的影响更为明显,使其具有了强烈的永久位移。主梁的横桥向峰值位移和残余位移随着震级的增大而增大,由于断层错动,断层左侧的 1# 主梁梁端的峰值位移和残余位移与断层右侧所有梁端的峰值位移和残余位移呈相反方向,使 1# 主梁发生剧烈刚性旋转。 $M=6.5$ 和 $M=6.7$ 时,由于 4# 主梁左侧支座和挡块等构件的损伤较小,还有一定限制约束能力,使 4# 主梁也发生了剧烈刚性旋转。

4 参数分析

4.1 穿越角度

为探究不同断层穿越角度对桥梁结构地震反应的影响,本文选取桥梁轴向与断层交角 θ ,以 15° 为间隔计算了穿越角度在 $15^\circ \sim 165^\circ$ 时桥梁的地震响应。

首先分析 1#、2# 和 3# 墩墩底的最不利剪力、弯矩和扭矩随着断层穿越角度 θ 的变化情况。图 9 给出了在不同穿越角度下沿纵桥向和横桥向各个桥墩墩底的最不利剪力。纵桥向桥墩的最不利剪力随着断层穿越角度从 0° 到 90° 逐渐减小,但穿越角度从 90° 到 180° 时,最不利剪力逐渐增加,而横桥向最不利剪力则呈现出与纵桥向相反的变化趋势。当穿越角度为 90° 时墩底纵桥向剪力最小,横桥向剪力最大。

图 10 给出了 1#、2# 和 3# 墩墩底的最不利弯矩和扭矩随断层穿越角度的变化情况。如图 10a 所示,在穿越角度为 $5^\circ \sim 60^\circ$ 时,1#、2# 和 3# 桥墩纵桥向的墩底最不利弯矩呈迅速增加的状态,当穿越角度为 60° 时,墩底最不利弯矩达到最大值;当 θ 为 $60^\circ \sim 105^\circ$ 时,最不利弯矩迅速减小的形态;当穿越角度为 $105^\circ \sim 175^\circ$ 时,最不利弯矩则为一个比较平稳的平台值。由图 10b 可以看出,当穿越角度为 $15^\circ \sim 45^\circ$ 和 $120^\circ \sim 175^\circ$ 时,1#、2#、3# 桥墩墩底的横桥向最不利弯矩呈增加趋势;当穿越角度为 $45^\circ \sim 120^\circ$ 时,桥墩墩底的横桥向最不利弯矩呈减小趋势。断层距离越远,纵、横桥向桥墩墩底的最不利弯矩越小。由图 10c 可以看出,1#、2#、3# 桥墩底的最大扭矩随断层穿越角度的增大呈先增大后减小的趋势,当穿越角度为 90° 时最不利扭矩最大。结合梁端两侧边支座纵向位移反应并不不同的特点,可知支座发生了扭转变形,说明跨断层桥梁结构的扭转问题是不可忽视的。

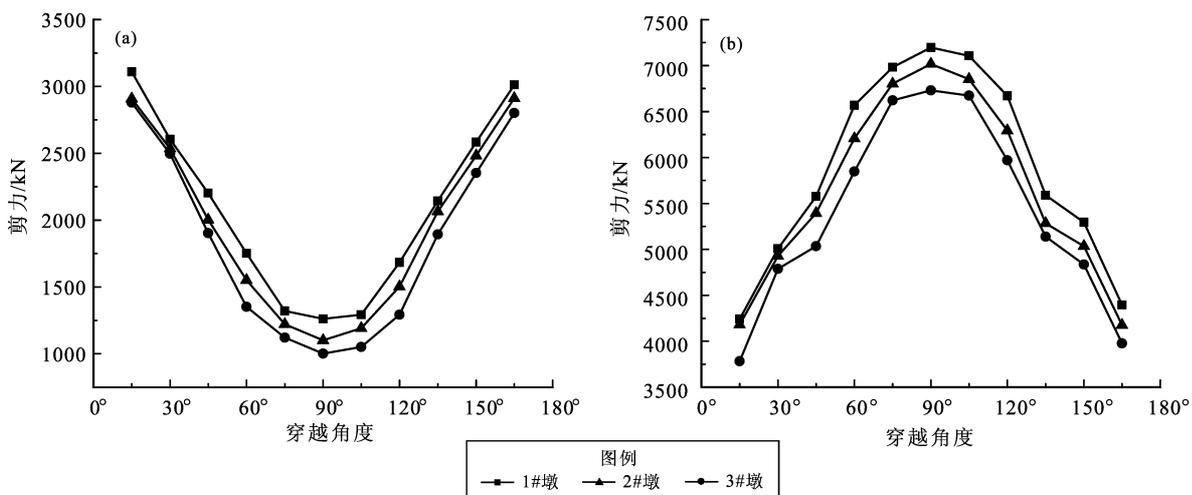


图 9 墩底纵 (a)、横 (b) 桥向最不利剪力随断层穿越角度的变化

Fig. 9 Variation of the unfavorable shear along the longitudinal (a) and transverse (b) bridge directions at the bottom of the pier with the fault crossing angle

4.2 穿越位置

为了研究断层穿越位置对跨断层简支梁桥地震反应及构件损伤的影响，假设断层从桥梁第2跨以90°穿越，通过与从边跨第1跨穿越进

行对比，分析桥墩、支座、及主梁等关键构件的位移反应。

图11a给出了 $M=6.5$ 、 6.7 和 7.6 时，1#~4# 主梁的纵桥向峰值位移和残余位移。由图11a可以

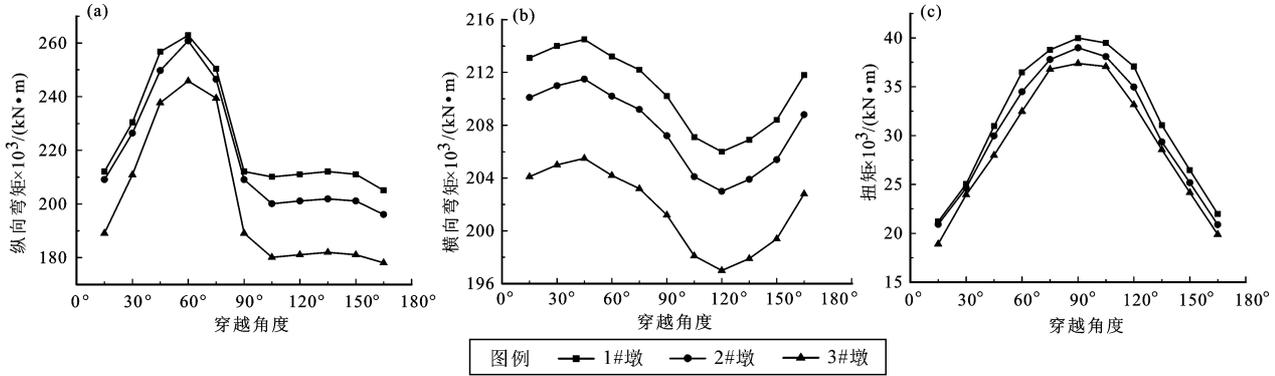


图10 墩底纵 (a)、横 (b) 向最不利弯矩和扭矩 (c) 随断层穿越角度的变化

Fig. 10 Variation of the unfavorable bending along the longitudinal (a) and transverse (b) and torsion moment at the bottom of the pier (c) bridge directions with the fault crossing angle

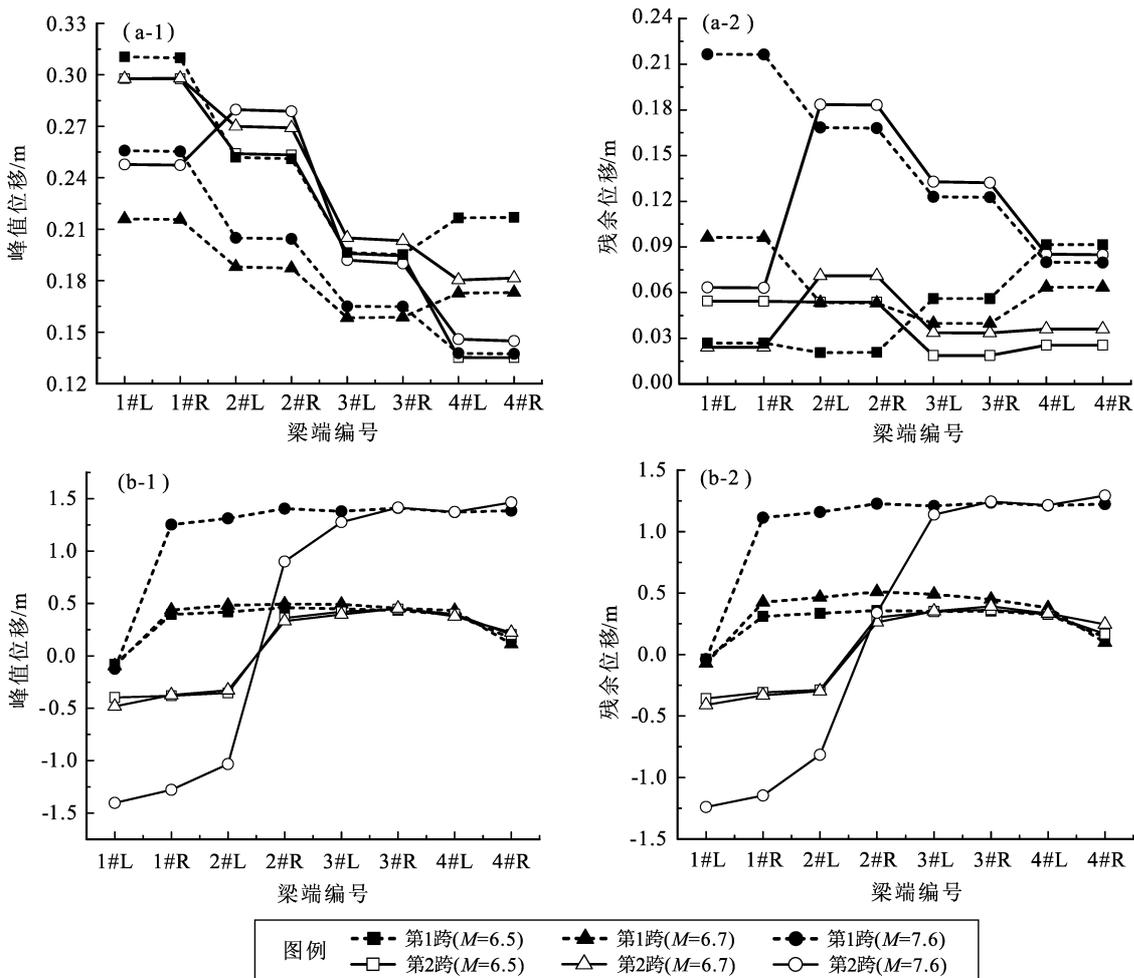


图11 主梁沿纵 (a)、横 (b) 桥向的峰值位移和残余位移

Fig. 11 Displacement response of the girder along the longitudinal (a) and transverse (b) bridge directions

看出，穿越位置由第1跨变为第2跨时，2#和3#主梁的纵向峰值位移会增加，尤其是 $M = 6.7$ 和 7.6 时，峰值位移的增加更加明显；当 $M = 6.7$ 时，2#和3#主梁的纵桥向峰值位移比断层从边跨穿越时的纵桥向峰值位移依次增大了约30%和22%。穿越位置的改变也会改变1#~4#主梁的纵桥向残余位移。不同震级下，除了2#主梁的纵向残余位移均会增大外，其余主梁受穿越位置变化的影响并不一致。纵桥向峰值位移也有类似表现，由前文分析可知不同震级下，跨断层地震动向前方向性效应和滑冲效应的耦合对结构反应的影响并不一致，故主梁的纵向峰值位移和残余位移的变化情况比较复杂。图11b给出了 $M = 6.5$ 、 6.7 和 7.6 时，1#~4#主梁沿横桥向的峰值位移和残余位移。从图中可知，断层从第2跨穿越时，会增加1#和2#主梁的横向峰值位移和残余位移反应，但对3#和4#主梁的位移影响较小，3#主梁位移小幅减小，4#主梁的位移小幅增加。断层位置的改变使2#主梁发生严重刚性旋转。可以看出，在不同震级时，断层穿越

位置对主梁横桥向位移反应的影响规律基本一致，因为主梁横桥向主要受跨断层地震动平行断层的滑冲效应影响最为明显，受两种效应耦合影响较小。

图12给出了断层从第1跨和第2跨穿越桥梁结构时1#、2#、3#桥墩的纵、横桥向位移峰值及其位移延性系数。从图上可以看出，当 $M = 6.5$ 和 7.6 时，与断层从桥梁边跨穿越相比，断层从中跨穿越时，桥墩纵向峰值位移略有增加，其中1#桥墩的峰值位移增加最为明显，当 $M = 6.7$ 时，纵向位移略有减小，1#、2#、3#桥墩的纵桥向位移减小幅度基本一致，这可能也是因为跨断层地震动向前方向性效应和滑冲效应的耦合作用，使得不同震级下，断层穿越位置的影响略有不同。断层从中间穿越时，无论震级大小，桥墩的横向峰值位移造成的1#、2#、3#桥墩的损伤均有所降低，尤其当 $M = 6.7$ 和 7.6 时，桥墩横向位移大幅降低，这可能是由于本研究没有考虑了桩基的影响，加之跨断层地震动两种效应的耦合作用，使桥墩横桥向损伤有所减轻。

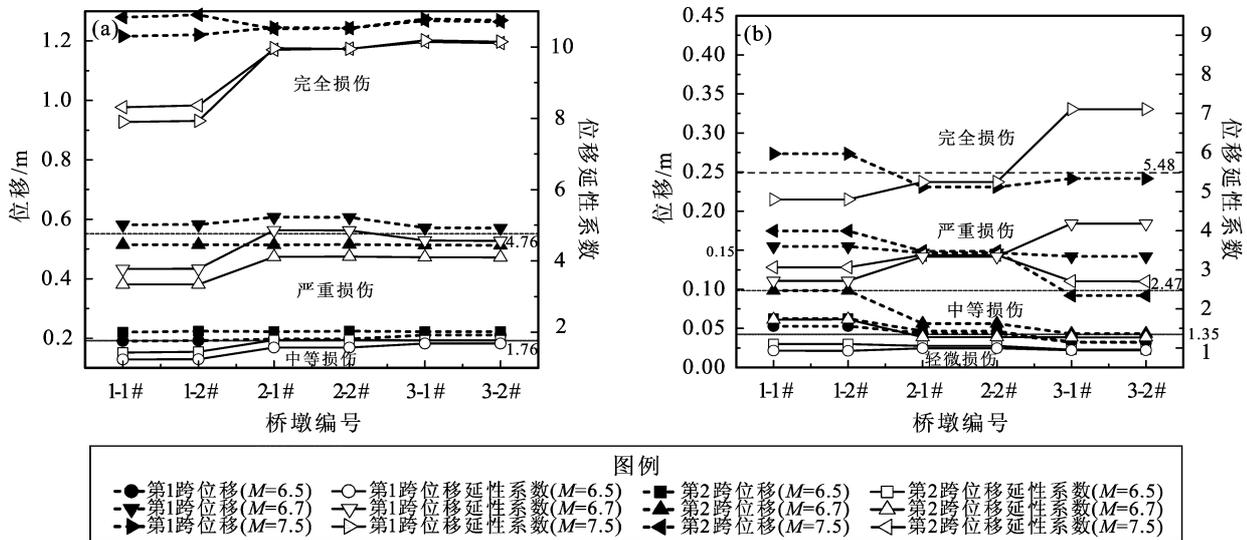


图12 桥墩沿纵 (a)、横 (b) 桥向的位移及位移延性系数

Fig. 12 Displacement and displacement ductility ratio of the pier along the longitudinal (a) and transverse (b) bridge directions

图13给出了 $M = 6.5$ 、 6.7 和 7.6 时，各支座的纵横向峰值位移。断层从桥梁第2跨穿越，会增大1#和2#主梁处的支座位移反应，尤其当 $M = 7.6$ 时，增加最为明显，但对3#桥墩和4#桥台处的支座纵向位移反应影响较小，所以两处支座的纵向

位移变化不大。由于断层穿越位置的变化，使得0#桥台距离断层相对较远，故0#桥台处的支座的纵向位移略有减小。由于断层从1#和2#桥墩之间穿过，会使1#R和2#L支座的横桥向位移增大。震级较小时，由于挡块的约束，支座横向位移增加并

不明显，而当 $M = 7.6$ 时，挡块发生破坏，失去约束作用，支座的位移大幅增加。断层穿越位置的改变，对其余位置的支座横向位移影响并不明显。但断层无论是从边跨穿越还是中跨穿越，均会使桥台处支座剧烈滑动，桥墩处支座也均达到板式支座的

滑动屈服位移，且根据前文研究，支座峰值位移出现在地震早期，即板式支座在跨断层地震动下很早已滑动失效，其工作性能受到严重影响。因此要提升受到跨断层地震动威胁的板式支座多跨筒支梁桥的抗震性能，需防止其支座过早滑动。

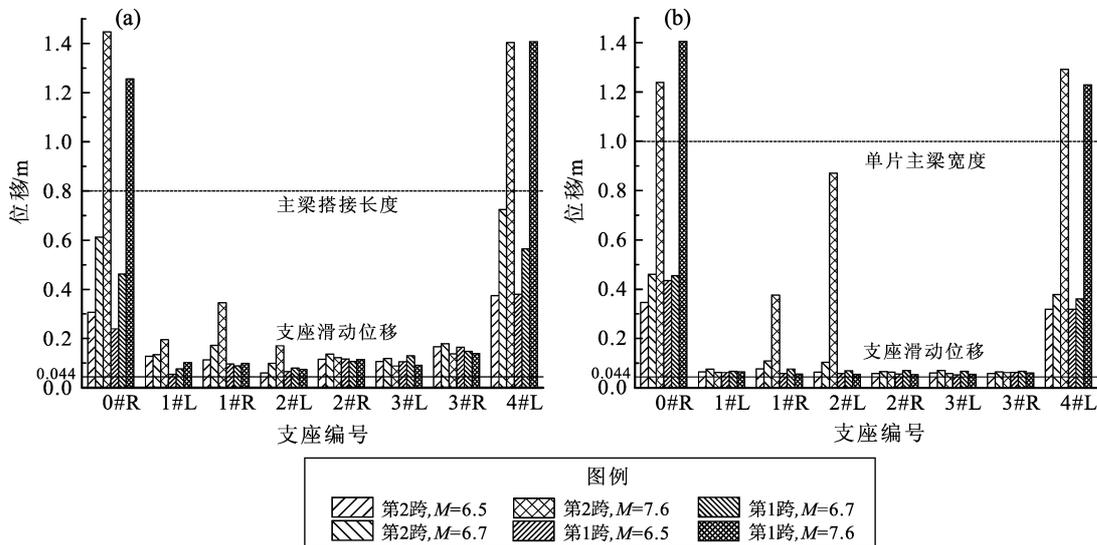


图 13 桥梁各支座沿纵 (a)、横 (b) 桥向的峰值位移

Fig. 13 Peak displacement of each bridge bearings along the longitudinal (a) and transverse (b) bridge directions

5 结论

本文研究了跨走滑断层多跨筒支梁桥在地震动作用下的地震反应，分析了断层的不同穿越角度和穿越位置对多跨筒支梁桥地震反应的影响，得到以下主要结论：

(1) 地震动作用下，跨走滑断层桥梁结构的位移反应剧烈。震级较大时，剧烈的地震反应会使桥墩纵横向均发生严重损伤，同时板式橡胶支座开始过早滑动，进一步放大了主梁的位移，加剧了落梁风险。

(2) 断层的穿越角度对多跨筒支梁桥地震反应的影响较为明显，断层垂直穿越桥跨时对桥墩横向反应最为不利；断层的穿越位置对不同构件的反应峰值影响规律较为复杂，断层从桥梁中跨穿越比从边跨穿越更易引发落梁。

(3) 地震动作用下，跨走滑断层筒支梁桥的桥墩和支座表现出较大的扭转需求，在对其开展设计分析时须关注墩柱和支座的抗扭性能。

参考文献：

- 高健峰,李建中,方志伟. 2021. 不同减隔震支座对跨断层桥梁地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 41(4): 48-59.
- Gao J F, Li J Z, Fang Z W. 2021. Effects of different seismic mitigation or isolation bearings on seismic responses of bridges crossing fault-rupture zones[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 41(4): 48-59. (in Chinese)
- 惠迎新,王克海,吴刚,等. 2015. 跨断层桥梁地震响应分析及合理跨越角度研究[J]. 振动与冲击, 34(13): 6-11, 17.
- Hui Y X, Wang K H, Wu G, et al. 2015. Seismic response of bridges crossing faults and their best crossing angles [J]. Vibration and Shock, 34(13): 6-11, 17. (in Chinese)
- 贾宏宇,杨健,郑史雄,等. 2021. 跨断层桥梁抗震研究综述[J]. 西南交通大学学报, 56(5): 1075-1093.
- Jia H Y, Yang J, Zheng S X, et al. 2021. A review on aseismic bridges crossing fault rupture regions[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 56(5): 1075-1093. (in Chinese)
- 江辉,王敏,曾聪,等. 2020. 分级地震下跨断层高铁筒支梁桥行车安全与抗震设计优化研究[J]. 工程力学, 37(10): 70-84.
- Jiang H, Wang M, Zeng C, et al. 2020. Running safety and seismic design optimization of fault-crossing simply-supported girder bridge of high-speed railway under earthquakes with different intensities [J]. Engineering Mechanics, 37(10): 70-84. (in Chinese)

- 江辉,张鹏,黄磊,等.2021.跨断层简支钢箱梁桥的概率性地震损伤特性研究[J].振动与冲击,40(15):253-262.
- Jiang H, Zhang P, Huang L, et al. 2021. Probabilistic seismic damage characteristics of simply supported steel box girder bridge across fault [J]. Journal of Vibration and Shock, 40 (15); 253 - 262. (in Chinese)
- 李帅,张凡,颜晓伟,等.2017.近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J].中国公路学报,30(2):86-97,106.
- Li S, Zhang F, Yan X W, et al. 2017. Synthetic method for near - fault ground motions and its influence on seismic response of super - span cable - stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 30(2):86-97,106. (in Chinese)
- 刘新华,冯鹏程,邵旭东,等.2020.海文跨海大桥设计关键技术[J].桥梁建设,50(2):73-79.
- Liu X H, Feng P C, Shao X D, et al. 2020. Key design technique for Haiwen Sea - crossing Bridge [J]. Bridge Construction, 50(2):73-79. (in Chinese)
- 石岩,李军,秦洪果,等.2021.桥梁双柱式排架墩抗震性能研究进展述评[J].中国公路学报,34(2):134-154.
- Shi Y, Li J, Qin H G, et al. 2021. Review on seismic performance of bridge double - column bents [J]. China Journal of Highway and Transport, 34(2):134-154. (in Chinese)
- 石岩,王东升,韩建平,等.2017.桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J].地震工程与工程振动,37(5):118-128.
- Shi Y, Wang D S, Han J P, et al. 2017. Application status of seismic isolation for bridges and its development tendency [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 37(5):118-128. (in Chinese)
- 田玉基,杨庆山,卢明奇.2007.近断层脉冲型地震动的模拟方法[J].地震学报,29(1):77-84,114.
- Tian Y J, Yang Q S, Lu M Q. 2007. Simulation method of near - fault pulse - type ground motion [J]. Acta Seismologica Sinica, 29(1):77-84,114. (in Chinese)
- 田玉基,杨庆山.2005.地震地面运动作用下结构反应的分析模型[J].工程力学,(6):170-174.
- Tian Y J, Yang Q S. 2005. Analysis models and methods for structural seismic responses [J]. Engineering Mechanics, (6): 170 - 174. (in Chinese)
- 项乃亮,崔侠侠,李建中.2016.板式橡胶支座滑动摩擦性能试验及其力学模型[J].同济大学学报(自然科学版),44(12):1828-1834.
- Xiang N L, Cui X X, Li J Z. 2016. Experimental study on sliding friction behavior of laminated rubber bearing and its mechanical model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 44 (12): 1828 - 1834. (in Chinese)
- 徐略勤,李建中.2016.新型滑移挡块的设计、试验及防震效果研究[J].工程力学,33(2):111-118,199.
- Xu L Q, Li J Z. 2016. Design and experimental investigation of a new type sliding retainer and its efficacy in seismic fortification [J]. Engineering Mechanics, 33(2):111-118,199. (in Chinese)
- 曾聪,江辉,黄磊,等.2021.跨断层独塔斜拉桥的非线性地震响应特性研究[J].中国公路学报,34(2):230-245.
- Zeng C, Jiang H, Huang L, et al. 2021. Nonlinear seismic response characteristics of fault - crossing single - tower cable - stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 34 (2): 230 - 245. (in Chinese)
- 张凡,李帅,王景全.2022.跨倾滑正断层桥梁地震响应数值模拟[J].建筑结构学报,43(5):205-216.
- Zhang F, Li S, Wang J Q. 2022. Numerical analysis on seismic response of bridges crossing normal rupture zone [J]. Journal of Building Structures, 43(5):205-216. (in Chinese)
- 宗周红,林元铮,林津,等.2023.跨断层地震动及其对桥梁结构影响研究进展[J].中国公路学报,36(1):80-96.
- Zong Z H, Lin Y Z, Lin J, et al. 2023. Across - fault ground motions and their effects on bridge structures: the state - of - the - art [J]. China Journal of Highway and Transport, 36(1):80-96. (in Chinese)
- JT/T04—2019,公路桥梁板式橡胶支座[S].
- JT/T04—2019, Laminated bearing for highway bridge [S]. (in Chinese)
- JT/T 2231 - 01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- JT/T 2231 - 01—2020, Specifications for seismic design of highway bridges [S]. (in Chinese)
- Baker J W, Lin T, Shahi S K, et al. 2011. New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program [R] // Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley. PEER Report. California, USA.
- Cork T G, Kim J H, Mavroeidis G P, et al. 2016. Effects of tectonic regime and soil conditions on the pulse period of near - fault ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 80:102-118.
- FEMA. 1999. HAZUS99; User's manual [S]. Washington D C, UAS.
- Ghahari S F, Jahankhah H, Ghannad M A. 2010. Study on elastic response of structures to near - fault ground motions through record decomposition [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(7):536-546.
- Halldórsson B, Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. 2011. Near - fault and far - field strong ground - motion simulation for earthquake engineering applications using the specific barrier model [J]. Journal of Structural Engineering, 137(3):433-444.
- Hwang H, Liu J B, Chiu Y H. 2001. Seismic fragility analysis of highway bridges [R]. Mid - America Earthquake Center Technical Report, MAEC - RR - 4 Project.
- Jia H, Chen S, Guo D, et al. 2024. Track - bridge deformation relation and interaction of long - span railway suspension bridges subject to strike - slip faulting [J]. Engineering Structures, 300:117216.
- Li S, Zhang F, Wang J Q, et al. 2017. Effects of near - fault motions and artificial pulse - type ground motions on super - span cable - stayed bridge systems [J]. Journal of Bridge Engineering, 22 (3): 04016128.
- Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. 2003. A mathematical representation of

- near - fault ground motions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 93 (3) : 1099 - 1131.
- Park S W, Ghasemi H, Shen J, *et al.* 2004. Simulation of the seismic performance of the Bolu Viaduct subjected to near - fault ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 33 (13) : 1249 - 1270.
- Silva P F, Megally S, Seible F. 2009. Seismic performance of sacrificial exterior shear keys in bridge abutments [J]. Earthquake Spectra, 25 (3) : 643 - 664.
- Ucak A, Mavroeidis G P, Tsopelas P. 2014. Behavior of a seismically isolated bridge crossing a fault rupture zone [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 57 : 164 - 178.
- Yang S, Mavroeidis G P, Ucak A, *et al.* 2017. Effect of ground motion filtering on the dynamic response of a seismically isolated bridge with and without fault crossing considerations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92 : 183 - 191.
- Yang S, Mavroeidis G P, Ucak A. 2020. Analysis of bridge structures crossing strike - slip fault rupture zones: A simple method for generating across - fault seismic ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 49 (13) : 1281 - 1307.
- Yang S, Mavroeidis G P. 2018. Bridges crossing fault rupture zones: A review [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 113 : 545 - 571.

Seismic Response Characteristics and Parameter Analysis of the Multi - span Simply Supported Girder Bridge across Strike - slip Faults

SHI Yan, WANG Wenxian, ZHAO Haomiao, YANG Xiong, CHAI Wenyang
(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract

To investigate the seismic response of the multi - span simply supported girder bridge across the strike - slip fault, a 3 - dimensional dynamic elastic - plastic analysis model is established for a 4 - span simply supported girder bridge by using OpenSees. Forty sets of bidirectional ground motions across the fault are synthesized by the decomposition - incorporation method. These ground motions are then input into the model through multi - support excitation. A dynamic nonlinear time history analysis is carried out to investigate the seismic response of the multi - span simply supported girder bridge under the action of the ground motions across the strike - slip fault. In addition, the effects of the crossing angle and the crossing position of the multi - span simply supported girder bridge across a strike - slip fault on the bridge are analyzed. The results show that the bridge under the action of the ground motions across a strike - slip fault will experience a significant displacement response. Both the crossing angle and the crossing position have a significant effect on the seismic response of the bridge. Additionally, the torsion effect of the simply supported girder bridge under the action of the cross - fault ground motions should not be neglected.

Keywords: across - fault ground motions; multi - span simply supported girder bridge; seismic response; seismic damage; parameter analysis