

地震激励方向对简支斜交桥地震响应的影响

夏 雪，徐略勤，张 超，朱 林

(重庆交通大学 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074)

摘 要: 为揭示地震激励方向对简支斜交桥地震响应的影响,并验证现行规范中有关地震输入方向的合理性,以汶川震区某多跨简支斜交桥为例,采用 SAP2000 建立了全桥三维分析模型,利用非线性时程分析法研究了桥例在不同地震激励方向下的地震响应规律。结果表明:地震激励方向对简支斜交桥地震响应的影响很大;当地震沿桥梁纵轴线或垂直于支承线激励时,支座的纵向位移最大,横向位移最小,且支座纵、横向位移存在明显的耦合现象,但此时主梁平面转角并非最大;主梁平面转角随地震激励 α 角的增大呈先增后减再增的趋势,在 α 角为 $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 时出现最大值;在各激励方向下,支座几乎都发生双向滑移,而桥墩几乎都处于弹性状态,说明控制桥梁纵、横耦合位移是抗震设防的关键。

关键词: 简支斜交桥; 地震激励方向; 板式橡胶支座; 平面转角

中图分类号: U448.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0141-06

Influence of Seismic Excitation Direction on the Seismic Response
of Simply-supported Skewed Bridge

XIA Xue, XU Lue-qin, ZHANG Chao, ZHU Lin

(State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University,
Chongqing 400074, China)

Abstract: To reveal the influence of seismic excitation direction on the seismic response of simply-supported skewed bridge, and verify the rationality of the seismic input direction under existing norms, taking a multi-span simply-supported skewed bridge in Wenchuan earthquake area as an example, SAP2000 is used to construct a three-dimensional analysis model of the whole bridge, and the nonlinear time history analysis method is used to study the seismic response law of the bridge under different seismic excitation angles. The results show that the direction of seismic excitation has a great influence on the seismic response of simply-supported skew bridge; when the earthquake is excited along the longitudinal axis of the bridge or perpendicular to the support line, the longitudinal displacement of the support is the largest and the transverse displacement is the smallest, and the longitudinal and transverse displacement of the support have obvious coupling phenomenon, but the plane angle of the main beam is not the largest. When the α angle of the seismic excitation increases, the plane rotation of the girder increases first, then decreases and then increases, the maximum rotation appears when the angle α is $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$. In each excitation direction, the support almost has two-way slip, and the piers are almost in an elastic state, indicating that controlling the longitudinal and transverse coupling displacement of the bridge is the key to seismic fortification.

Key words: simply-supported skewed bridge; seismic excitation direction; laminated rubber support; plane rotation

收稿日期: 2019-08-23 修回日期: 2020-04-11

作者简介: 夏 雪 (1996-), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向为桥梁抗震 (Email: xiaxueup@ 163.com)

通讯作者: 徐略勤 (1983-), 男, 江西上饶人, 博士, 副教授, 研究方向为桥梁抗震 (Email: xulueqin@ 163.com)

基金项目: 国家自然科学基金 (51978113); 重庆市自然科学基金 (cstc2019jcyj-msxmX0691); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ201600712182)

由于地形条件和交通线路的限制,主梁与桥墩经常很难满足正交的要求。随着我国公路里程的不断增长,斜交桥已成为交通线路上的重要组成部分。其中,多跨简支斜交桥的数量尤其庞大。这类桥梁通常采用板式橡胶支座,且不设置支座锚固措施,因此墩-梁之间的连接往往较弱。汶川地震表明,这类简支斜交桥在地震作用下的动力响应比正交桥更复杂,破坏也更严重^[1,2]。因此,相比于正交桥,斜交桥的抗震性能研究理应得到更大的重视^[3]。

在对桥梁结构进行地震响应分析时,首先要假定地震动的输入方向。由于加速度的矢量特性,在不同地震动输入角度作用下,结构及构件的地震响应明显不同^[4]。对于正交桥来说,地震沿着桥梁轴线及其垂直方向输入一般能得到最不利的响应^[5],但这对于斜交桥来说就不一定适用了。关于地震输入角度问题,近年来,李小珍等^[6]研究了地震输入角度对部分斜拉桥动力响应的影响,并探讨了最不利输入角度的选取;孙佳音等^[7]研究了地震断层走向对近断层桥梁动力响应的影响,但这些研究都不是针对斜交桥。对于斜交桥的地震输入问题,顾红飞等^[8]基于线性时程分析法初步确定了斜交桥的最不利输入方向及结构响应最大值的理论推导过程;廖兴和郭劲钦等^[9,10]研究了斜交桥在任意角度输入下多向地震作用反应,提出了斜交桥简化的地震反应计算理论;Deepu 等^[11,12]提到采用双向输入的方式,但没有专门探讨不同输入角度的影响;Maleki 等^[13,14]采用了多种地震响应组合方法来研究地

震波输入方向对斜交桥地震响应的影响。我国 JTG/T B02-01—2008《公路桥梁抗震设计细则》(以下简称“细则”)^[5]规定:对于直线桥,可分别考虑沿顺桥向和横桥向两个水平方向输入地震;对于曲线桥,可分别沿相邻两桥墩连线方向和垂直于连线水平方向进行多方向地震输入,以确定最不利输入方向。可见,细则并没有专门针对斜交桥提出地震输入方向的指导建议。汶川震害表明,斜交桥明显有别于通常意义上的直线桥(正交桥)。因此,如何确定其地震激励方向值得深入研究。有鉴于此,本文围绕典型多跨简支斜交桥的地震激励方向问题展开研究,以期为该桥型的抗震分析与设计提供参考。

1 分析模型

1.1 桥例概况

从西南某高速公路桥梁中选取典型结构作为本文研究对象。如图 1 所示,所选结构为 5×20 m 简支 T 梁桥,斜交角为 15°。上部结构由 5 片预应力 T 梁组成,采用 C45 混凝土,桥宽 11.75 m,梁高 1.48 m。伸缩缝型号为 GQF-C40。下部结构为圆形双柱墩,直径为 1.5 m,各墩均高 20 m;双柱墩上设有矩形盖梁,高 1.6 m,顺桥向宽 1.5 m,横桥向长 10.4 m;双柱墩间设有矩形系梁,高 1.5 m,宽 1.2 m,墩身、盖梁和系梁均采用 C35 混凝土。支座为圆板橡胶支座,型号为 GYZ200×42 mm,每片 T 梁两侧各设置一个。支座基础采用桩柱式,为 C30 混凝土。

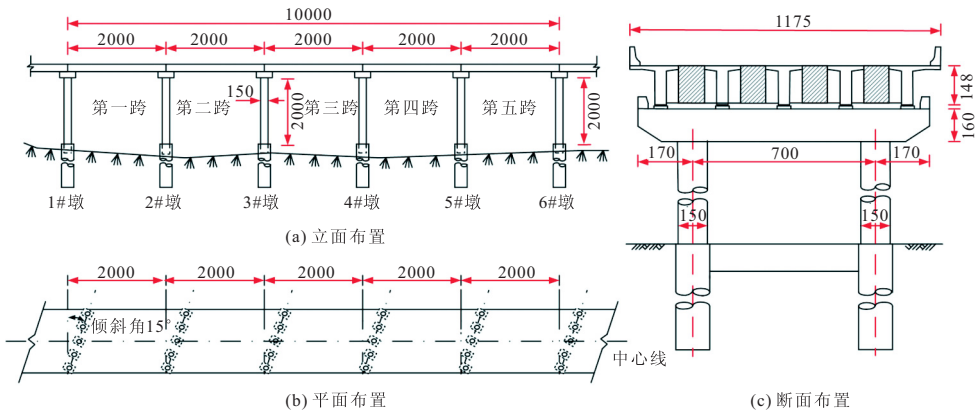


图1 桥例布置/cm

1.2 有限元建模

采用 SAP2000 建立全桥有限元模型。主梁按梁格法模拟,5 片 T 梁采用线弹性梁单元模拟,横梁采用虚拟梁单元模拟,沿顺桥向每隔 1 m 设置一道。由于桥例斜交角较小,纵梁与横梁斜交

形成斜交网格^[15]。汶川震害表明,由于板式橡胶支座的滑移隔震作用,桥墩在地震作用下普遍处于弹性受力状态,因此本文采用线弹性梁单元模拟桥墩。按照细则,中小跨径梁桥可不考虑桩-土共同作用,因此本文将墩底的 6 个自由度均进

行固定。对于圆板橡胶支座,根据细则,采用解耦弹簧模拟纵(横)向、竖向平动刚度 k_{bh} , k_{bv} 及绕横桥向转动刚度 k_{br} ,其计算公式为:

$$k_{bh} = \frac{G_b A_b}{\sum t}, k_{bv} = \frac{E_b A_b}{\sum t}, k_{br} = \frac{E_b I_b}{2 \sum t} \tag{1}$$

式中: G_b 为橡胶支座的剪切模量,根据细则取 1200 kN/m^2 ; A_b 为支座橡胶板的面积; $\sum t$ 为橡胶层总厚度; E_b 为支座竖向抗压模量; I_b 为单个支座沿弯曲方向的惯性矩。

根据文献[16]的研究成果,由于没有固定措施(如图2a),板式橡胶支座在地震中极易发生滑移(如图2b),从而对下部墩柱产生隔震效果。为了模拟支座的这种滑移现象,采用图2c所示的理想弹塑性单元模拟支座在两个水平方向的力学行为。其中, F_b 为支座滑移的临界摩擦力,支座摩擦系数取为0.15。根据试验结果^[17],当支座滑移后,其滑移刚度 \bar{k}_{bh} 几乎为零。

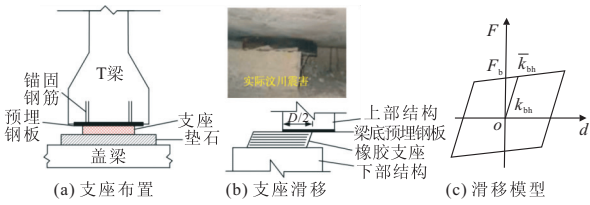


图2 支座滑移与分析模型

在桥例中,盖梁两侧设有钢筋混凝土挡块。但在汶川地震中,挡块发生了大面积的剪断破坏,很多挡块在发震初期就已经失效,因此本文不考虑挡块的有效作用。对于邻梁间的碰撞现象,由于本文桥例等跨等墩高,各桥跨在地震中以同步

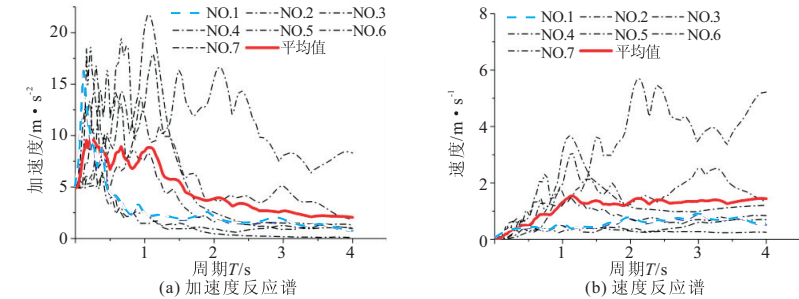


图4 各地震波反应谱

本文主要研究地震激励方向对多跨简支斜交桥地震响应的影响。因此,地震波按水平向+竖向的组合输入。其中,水平向输入方式如图5所示。图中的 α 角表示水平地震动激励方向和顺桥向的夹角,其中 $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$,按 30° 的间隔递增。在后文的结果分析中,有关时程响应的结果均以NO.1地震波为例,其余分析结果以7条波的平均值为准。

振动为主,且伸缩缝间隙为 10 cm ,前期数值验证表明,在本文7条地震波作用下碰撞几乎不发生,为提高计算效率,模型中不考虑邻梁碰撞。此外,本文桥例模型为 $5 \times 20\text{ m}$ 多跨斜交简支梁,为计入边跨梁的影响,在下文的地震响应分析中,取第二、三、四跨为研究对象。全桥局部有限元模型示意图如图3所示。

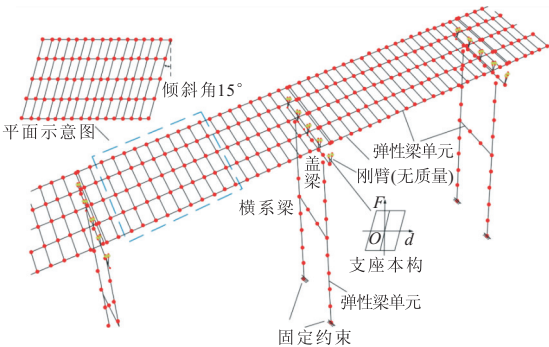


图3 局部有限元模型图示

2 地震动输入

因所选取算例桥梁位于西南地区,综合考虑场地土、震中距、震级等对地震动特性的影响,按照Ⅱ类场地,从PEER数据库中选取7组符合所选桥梁场地特征的实际地震记录以考虑地面运动的不确定性,每组均包含一条水平向和一条竖向地震波。为便于对比分析和数据处理,将7组波中的水平峰值加速度PGA统一调整为 $0.5g$,竖向峰值加速度采用与水平向相同的调幅比例进行同步调整,调幅后7条波的加速度谱、速度谱和位移谱及其对应的平均谱如图4所示。

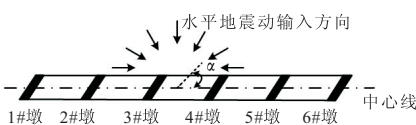


图5 水平地震动输入方向图示

3 结果分析

3.1 分析参数的选取

根据汶川震害和本文桥例特点,选取主梁、桥

墩及支座的关键地震响应作为分析对象。为了便于讨论,对分析对象进行如下处理:

(1)支座位移。根据细则,板式橡胶支座在地震作用下的位移 X_d 应满足 $X_d \leq \tan\gamma \sum t$,其中: $\sum t$ 表示橡胶层总厚度,桥例所采用的 GYZ200×42 mm 支座橡胶层总厚度为 30 mm; γ 为橡胶片剪切角,通常取 $\tan\gamma = 1.0$ 。因此,支座的分析参数为:

$$I_b = X_d / \tan\gamma \sum t \tag{2}$$

若 $I_b < 1.0$,表明该支座尚未发生滑移,反之则表明支座已发生滑移,且 I_b 值越大,说明支座滑移的程度越高,主梁落座的可能性也越高。

(2)主梁的纵、横向位移。该位移可以一定程度上反映主梁落座的风险。

(3)主梁的平面转角。由于主梁的平面刚度很大,因而可采用刚体运动来近似表示主梁的平面运动。主梁在平面内的旋转角度 θ_L 可通过单跨梁两侧梁端的横桥向相对位移除以单跨梁全长得到,即:

$$\theta_L = (\Delta_i - \Delta_j) / L \tag{3}$$

式中: Δ_i, Δ_j 分别为主梁两侧梁端 i, j 的横向位移; L 为主梁两侧梁端间的距离。

(4)桥墩的弹塑性状态。通过墩底截面的弹性弯矩与其屈服弯矩的比值来判断桥墩是否进入塑性,其分析参数为:

$$I_p = M_e / M_y \tag{4}$$

式中: M_e, M_y 分别为墩底截面的地震弯矩需求和屈服弯矩。其中,屈服弯矩为墩底截面的等效屈服弯矩,即对墩底截面进行 $P-M-\phi$ (P, M, ϕ 分别

为截面所受轴力、弯矩及曲率)分析获取 $M-\phi$ 曲线,然后对曲线进行等效双线性化处理,得到等效屈服弯矩^[5]。

3.2 支座位移指标分析

由于支座数量较多,本节选取典型的各墩中支座进行分析,如图 6 所示。由图可知,各墩上的支座位移指标随地震激励方向的变化规律大致相似。当地震激励方向 α 角由 0° 按 30° 递增至 180° 时,支座的 $I_{b纵}$ 呈先减小后增大的趋势,最大值出现在 $0^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 的激励方向上,最小值出现在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间;而 $I_{b横}$ 随地震激励方向的变化规律大致相反,呈先增后减的趋势,最大值和最小值对应的激励角度刚好与 $I_{b纵}$ 相反。不难发现, $I_{b纵}$ 的最大值在数值上比 $I_{b横}$ 略大,以 1#墩中支座为例, $I_{b纵}$ 的最大值为 6.75,而 $I_{b横}$ 的最大值为 4.78,前者比后者大 41.2%,这说明纵横方向上都已达到临界滑移状态,且纵向滑移相较横向滑移更严重。由 α 角与桥梁纵轴线的关系可知,当 α 角取值为 0° 和 180° 时,地震激励方向沿着桥梁纵轴线,当 α 角取值为 150° 时,地震激励方向大致与支座的支承线垂直。由图可推知,对于本文斜交角为 15° 的桥例,当地震沿着桥梁纵轴线或垂直于支座支承线激励时,支座的纵向位移最大,横向位移最小。值得注意的是,在各个地震激励角度下,支座的 $I_{b纵}$ 和 $I_{b横}$ 几乎都大于 1.0,最大值达到 6.75,这说明支座在大多数工况下都发生了滑移,且支座纵、横向位移产生耦合,即,即使地震沿着桥梁纵轴线激励时,支座也会产生纵、横向位移,这一点可以在图 7 中支座的滞回曲线得到印证,这是与正交桥完全不同的现象。

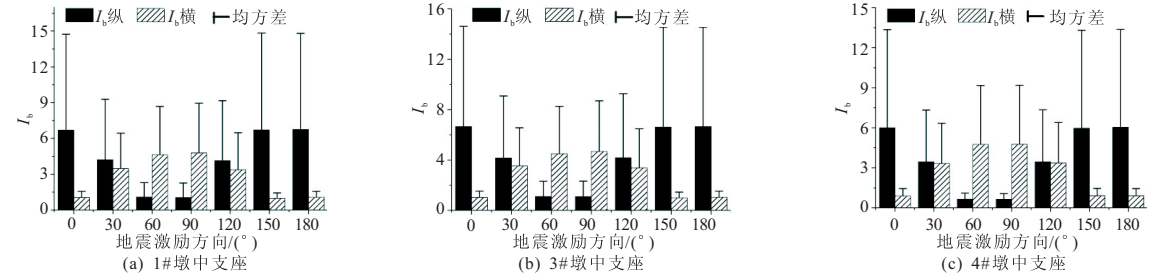


图 6 地震激励方向对支座位移指标的影响

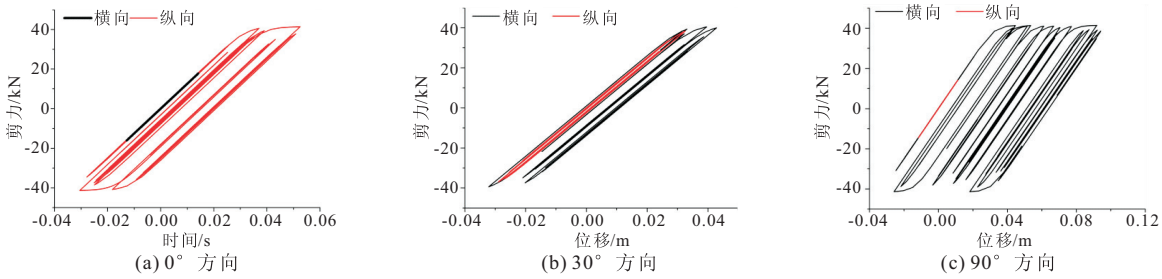


图 7 地震激励方向对支座响应的影响

图7给出了三个典型地震激励方向下1#墩中支座剪力-变形关系响应。当地震激励方向 α 角为 0° 时,支座的响应以纵向为主, $I_{b纵}=6.69$,发生了滑移,而横向也存在耦合的位移响应,发生了较小的滑移, $I_{b横}=1.05$;当地震激励方向 α 角为 30° 时,支座纵向和横向的响应较为接近, $I_{b纵}=4.22$, $I_{b横}=3.48$;当地震激励方向 α 角为 90° 时,支座的响应则以横向为主, $I_{b横}=4.78$,发生了明显的滑移,而纵向也同样存在耦合的位移响应, $I_{b纵}=1.05$ 。图7的曲线规律与图6是一致的,充分说明了斜交桥支座响应的纵横向耦合现象,这是导致斜交桥位移震害比正交桥严重的主要原因。

3.3 主梁位移分析

图8以地震波 NO.1 为例,给出了主梁横、纵向位移的典型结果。其中,图8a为在不同地震激励方向下对应于最大平面转角时主梁的横向位移

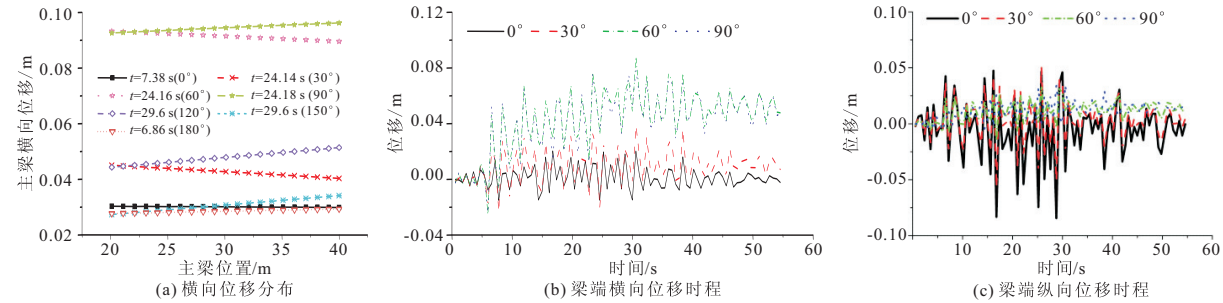


图8 地震激励方向对第二跨主梁位移的影响

3.4 主梁平面转角分析

由图9a可知,主梁平面内转角随地震激励 α 角的增大总体呈先增后减再增的趋势。不同地震波得到的结果有所差异,且主梁最大平面转角所对应的地震激励角度也不同,如在地震波 NO.4 作用下,主梁最大平面转角为 2.68×10^{-4} rad,对应的 α 角为 30° ;而在地震波 NO.5 作用下,主梁最大平面转角为 3.28×10^{-4} rad,对应的 α 角为 120° 。总的来说,当地震激励 α 角为 $30^\circ\sim 120^\circ$ 时,主梁平面转角明显比 α 角为 $0^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 时大,这与图8a的结果是吻合的,结论也一致,即:细则所规定的最不利地震输入方向对于本桥例而言不是最不利的。以地震波 NO.1 为例,图9b给出了在地震激励角为 $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 三个角度下主梁平面转角的时程图。由图可知,主梁的平面转角随时间变化的波动程度也因地震激励方向的不同而存在差异,主梁平面转角在 α 角为 30° 时最大,在 α 角为 90° 时最小。值得一提的是,在不同激励方向的地震持时内,主梁平面转角的数值没有出现反号的情况,即主梁始终朝一个方向转动,这与斜交桥主梁的平面转动机理是吻合的^[17],即在不考虑结构

分布情况及其出现的时刻。由图可知,当地震激励 α 角为 $30^\circ\sim 120^\circ$ 时,主梁的平面转角明显大于其余地震激励角度;且在不同地震激励角度下,主梁出现最大转角所对应的时刻均不相同。换言之,若地震激励 α 角沿着桥梁纵轴线或与支座的支承线垂直时,主梁的横向转角不是最不利的。这与细则所规定的最不利地震输入方向是不一致的。由图8b,8c可知,在同一地震波作用下,不同地震激励角度所对应的主梁纵、横向位移明显不同,且受到地震激励 α 角的影响程度也不同。当 α 角取 60° 和 90° 时,主梁横向位移随时间变化的波动相较于 0° 和 30° 对应的波动更为剧烈,幅值也大得多,且存在明显的残余位移;而此时相应的主梁纵向位移受地震激励 α 角的影响程度恰好相反,但纵向位移在不同激励角度下没有表现出明显的残余位移。

横纵向碰撞作用的情况下,支座的水平反力在斜交角的作用下产生的水平力矩引起桥面旋转。

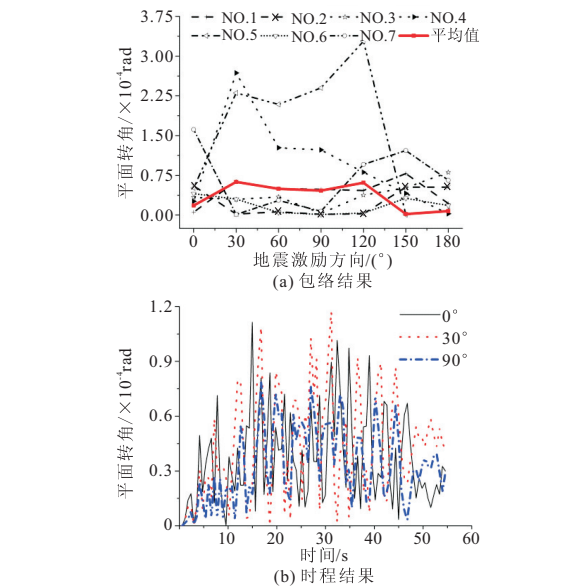


图9 地震激励方向对第二跨主梁平面转角的影响

3.5 桥墩弹塑性状态分析

以3#墩为例,表1给出了桥墩在不同地震激励方向下的弹塑性状态参数。由表可知,无论地震沿哪个角度激励,桥墩地震响应都呈现双向耦

合的规律,这与前文所分析的支座变形一样。当地震激励 α 角由 0° 增至 180° 时,桥墩纵向弯矩参数 I_{pL} 经历了先降后增的变化过程,而横向弯矩参数 I_{pT} 则经历了几乎相反的过程。除 α 角为 60° 和 90° 外,桥墩纵向弯矩参数都满足 $I_{pL} \geq 1.0$,即桥墩都不同程度地发生了屈服,其中当 $\alpha = 180^\circ$ 时,桥墩纵向屈服程度最高,对应的 $I_{pL} = 1.27$ 。在横桥向,各个地震激励方向下的桥墩均处于弹性状态,其横向弯矩参数 I_{pT} 最大值为 0.88,对应的地震激励 α 为 120° 。值得注意的是,当地震激励方向沿着垂直于桥梁纵轴线的方向时($\alpha = 90^\circ$,即细则所规定的横桥向), I_{pL} 和 I_{pT} 均小于 1.0,即此时桥墩在纵横向都未出现屈服。由表 1 可知,该激励方向无法得到最不利的分析结果,从抗震设计的角度而言是偏不安全的。

表 1 桥墩弹塑性状态分析参数

激励 方向 /(°)	纵桥向			横桥向		
	M_{yL} /kN·m	M_{eL} /kN·m	I_{pL}	M_{yT} /kN·m	M_{eT} /kN·m	I_{pT}
0	4007.0	4715.0	1.18	4007.0	2931.3	0.73
30	4007.0	4087.6	1.02	4007.0	3364.8	0.84
60	4007.0	2651.8	0.66	4007.0	3314.3	0.83
90	4007.0	2673.4	0.67	4007.0	3412.5	0.85
120	4007.0	4015.6	1.00	4007.0	3506.8	0.88
150	4007.0	4830.5	1.21	4007.0	3187.0	0.80
180	4007.0	5092.3	1.27	4007.0	2931.2	0.73

图 10 以 3#墩左柱为例,给出了地震波 NO.1 作用下墩底截面在 α 角为 $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$ 时的纵、横向弯矩时程曲线。由图可知,墩底截面纵、横向弯矩受地震激励角度变化的影响程度不同。纵向弯矩在地震激励 α 角为 0° 时的幅值最大,横向弯矩在地震激励角为 30° 和 90° 时的幅值较大,该结果与表 1 的规律一致。

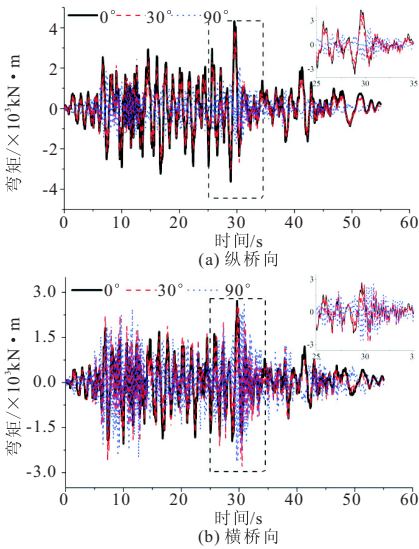


图 10 地震激励方向对墩底弯矩的影响

4 结 论

本文针对某典型多跨简支斜交桥,采用非线性时程分析法,研究了地震激励方向对桥梁地震响应的影响规律,主要结论如下:

- (1)当地震激励 α 角由 0° 增至 180° 时,支座纵向位移先减后增,而横向位移先增后减,且当地震沿着桥梁纵轴线或垂直于支座支承线激励时,支座纵向位移最大,横向位移最小。但无论 α 角如何变化,支座的纵、横向位移均存在纵、横桥向耦合的现象。
- (2)当地震激励 α 角沿着桥梁纵轴线或与支座的支承线垂直时,主梁的平面转角不是最不利的,这与细则的规定有所不同。因此,在斜交桥的平面转动控制中,应针对具体桥例专门研究其最不利的地震激励方向,否则计算结果可能偏不保守。
- (3)主梁平面转角随地震激励 α 角的增大总体呈先增后减再增的趋势。总的来说,本文桥例在地震激励 α 角为 $30^\circ \sim 120^\circ$ 时主梁平面转角最大。
- (4)当地震激励 α 角由 0° 增至 180° 时,桥墩纵向 I_{pL} 先降后增,而横向 I_{pT} 则相反, I_{pL} 在 $\alpha = 180^\circ$ 时出现最大值 1.27,而 I_{pT} 在 $\alpha = 120^\circ$ 时出现最大值 0.88。桥墩纵向在不同激励方向下普遍屈服,而横向始终为弹性,按照细则所规定的激励方向无法得到桥墩地震响应的最不利结果。
- (5)在各个地震激励角度下,支座的 $I_{b纵}$ 和 $I_{b横}$ 几乎都大于 1.0,最大值达 6.75,而桥墩的 I_{pL} 和 I_{pT} 普遍小于或接近 1.0,最大值仅 1.27,说明上部结构位移震害是多跨简支斜交桥的主要震害形式,这与汶川震害是吻合的,也说明控制桥梁的纵、横耦合位移是抗震设防的关键。

参 考 文 献

[1] 陈乐生,庄卫林,赵河清,等. 汶川地震公路震害调查:桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2012.

[2] 姚 凯,徐略勤,李建中,等. 采用板式橡胶支座的连续斜梁桥横向抗震行为研究[J]. 地震工程学报,2018, 40(2): 265-272.

[3] Wilson T, Mahmoud H, Chen S. Seismic performance of skewed and curved reinforced concrete bridges in mountainous states[J]. Engineering Structures, 2014, 70: 158-167.

[4] 张菊辉,管仲国. 匝道桥地震响应影响要素分析[J]. 桥梁建设,2015, 45(4): 58-63.

[9] 孙 彬, 毛诗洋, 王 霓, 等. 预成孔法检测装配式结构套筒灌浆饱满度的试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(23): 7-10.

[10] 李向民, 高润东, 许清风, 等. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接接头强度影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 52-56.

[11] 高润东, 李向民, 许清风. 装配整体式混凝土建筑套筒灌浆存在问题与解决策略[J]. 施工技术, 2018, 47(10): 1-4.

[12] 郭正兴, 颜 文. 装配式混凝土结构套筒灌浆连接灌浆料饱满度试验研究[J]. 江苏建筑, 2018, (3): 4-8.

(上接第 140 页)

[9] 秦顺全. 斜拉桥安装无应力状态控制法[J]. 桥梁建设, 2003, (2): 31-34.

[10] 王 桢, 罗 波, 吴海军, 等. 大跨径自锚式悬索桥几何非线性行为分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 1-6.

[11] Jung M R, Min D J, Kim M Y. Nonlinear analysis methods based on the unstrained element length for determining initial shaping of suspension bridges under dead loads[J]. Computers and Structures, 2013, 128: 272-285.

(上接第 146 页)

[5] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].

[6] 李小珍, 洪沁烨, 雷虎军, 等. 地震动输入方向对铁路部分斜拉桥地震响应的影响[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 26-32.

[7] 孙佳音. 近断层地震动输入方向对刚构桥地震反应影响[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.

[8] 顾红飞. 斜交箱梁桥地震响应特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

[9] 廖 兴. 斜交连续梁桥地震反应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

[10] 郭劭钦. 基于不同输入方向的斜交桥最不利地震动响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[11] Deepu S P, Prajapat K, Ray-Chaudhuri S. Seismic vulnerability of skew bridges under bi-directional ground motions [J]. Engineering Structures, 2014, 71: 150-160.

[12] Han Q, Chen J Y, Du X L, et al. Nonlinear seismic response of skewed highway bridges subjected to bidirectional near-fault ground motions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 04017032-1-14.

[13] Maleki S, Bisadi V. Orthogonal effects in seismic analysis of skewed bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(1): 122-130.

[14] Bisadi V, Head M. Evaluation of combination rules for orthogonal seismic demands in nonlinear time history analysis of bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(6): 711-717.

[15] 项海帆. 高等桥梁结构理论(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[16] 王军文, 湛 敏, 邓 琴, 等. 三跨斜交简支梁桥地震旋转机理及斜度影响研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(8): 1357-1362.

[17] Xiang N L, Li J Z. Effect of exterior concrete shear keys on the seismic performance of laminated rubber bearing-supported highway bridges in China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 112: 185-197.

(上接第 161 页)

[13] Abdeljaber O, Avci O, Kiranyaz M S, et al. 1-D CNNs for structural damage detection: verification on a structural health monitoring benchmark data[J]. Neurocomputing, 2018, 275: 1308-1317.

[14] Abdeljaber O, Avci O, Kiranyaz S, et al. Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 388: 154-170.

[15] Hoang D T, Kang H J. Rolling element bearing fault diagnosis using convolutional neural network and vibration image[J]. Cognitive Systems Research, 2019, 53: 42-50.