

文章编号: 1000-4750(2011)11-0237-07

地震波斜入射下考虑局部地形影响和土结动力相互作用的多跨桥动力响应分析

*郜新军^{1,3}, 赵成刚¹, 刘 秦²

(1. 北京交通大学土建学院, 北京 100044; 2. 黄河科技学院土木工程系, 河南, 郑州 450000; 3. 郑州大学土木工程学院, 河南, 郑州 450001)

摘 要: 在地震工程研究中同时考虑局部地形效应和土与结构动力相互作用对结构动力响应的影响是一个困难的问题。该文基于多源粘弹性人工边界理论, 利用通用有限元程序 ANSYS 建立了一种可以同时考虑地震波入射角度、土与结构动力相互作用及局部地形效应等因素影响的有限元分析模型。利用这一模型对一座 5 跨连续梁桥进行了动力响应分析, 结果表明: 结构内力随着地震波入射角度的变化而变化; 地形效应的影响使桥梁结构局部存在内力放大效应; 不考虑土-结构动力相互作用有可能较小的估计结构的内力; 同时土的物理性质对土-结构动力相互作用也有一定的影响。

关键词: 多跨桥梁地震反应分析; 多源粘弹性人工边界; 土-结构动力相互作用; 局部地形效应; 地震波; 斜入射; 土体物理性质

中图分类号: TU435; TU331.3 文献标志码: A

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF MULTI-SPAN VIADUCT CONSIDERING TOPOGRAPHIC EFFECT AND SOIL-STRUCTURE DYNAMIC INTERACTION BASED ON INCLINED WAVE

*GAO Xin-jun^{1,3}, ZHAO Cheng-gang¹, LIU Qin²

(1. School of Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Department of Civil and Structural Engineering, Huanghe Science and Technology College, Zhengzhou, Henan 450000, China;

3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: The seismic response analysis of the structure considering both topographic effect and soil-structure dynamic interaction simultaneously is a difficult problem in earthquake engineering research. Based on the viscous-spring superposition artificial boundary theory, a finite element model accounting for the incident angle, soil-structure dynamic interaction and topographic effect is built by using the ANSYS and a seismic response analysis of a five-span continuous beam bridge was carried out by the method. The numerical results demonstrate that the internal force changes with the increasing of incidence degrees; the internal force is magnified in a certain site because of the local topographic effect; compared with considering the soil-structure dynamic interaction effect, the internal force is smaller without such effect; simultaneously, physical properties of soil play a certain role in analysis of soil-structure dynamic interaction effect.

Key words: seismic responses analysis of multi-span continuous viaduct; viscous-spring superposition artificial boundary; soil-structure dynamic interaction; topographic effects; seismic wave; oblique incidence; physical properties of soil

收稿日期: 2010-03-10; 修改日期: 2010-05-30

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90715035); 北京市教委重点项目(KZ200810016007, KZ200910005002)

作者简介: *郜新军(1981—), 男, 河南南阳人, 博士生, 主要从事土-结构动力相互作用方面的研究(E-mail: 07115285@bjtu.edu.cn);

赵成刚(1955—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩土工程和防灾减灾工程等方面的研究(E-mail: cgzhao@bjtu.edu.cn);

刘 秦(1981—), 女, 陕西西安人, 助教, 硕士, 主要从事钢筋混凝土方面的教学和研究(E-mail: gxjun1981@eyou.com).

随着我国经济建设的迅速发展,越来越多的大跨桥梁将被建造,很多这种桥梁将位于高烈度地震区,对它们在跨越复杂局部场地条件并考虑土与结构动力相互作用的地震响应和抗震性能,因问题太复杂,研究较少。但由于实际工程的需要,应该受到重视。

从大量震害调查中已经发现,复杂的局部场地条件对抗震不利。由于复杂局部场地条件影响而遭受巨大损失的地区当属墨西哥城,1985年9月19日距墨西哥城400km以外的墨指根洲的海岸发生 $M_s=8.1$ 级的地震^[1],墨西哥城遭受到严重破坏,其震害程度不仅极大地超过周围地区,而且比震中区还严重,这主要是由于该城局部地质构造的影响而造成的。墨西哥城坐落在一个很深的盆地软粘土层上,长周期地震波和横向非均匀软土的相互作用使地面运动幅值较大,持续时间变长,因而造成了长周期结构物的严重破坏。实测地震记录和理论分析都表明,震害较重的场地,其地震动比平坦场地大,这说明复杂局部场地条件对地震动的影响不容忽视。

结构物与地基之间总是存在相互作用的。这种相互作用当地基的刚度较小时,更为突出,只有地基刚度比上部结构物大得多时,这种相互作用才可忽略不计。但当地基不是完全刚性时,土-结构物相互作用会改变结构的振动特征和地基的地震动。现有研究成果表明,对于大型结构物,结构物-地基动力相互作用将使结构的地震响应发生变化,它并不总使结构物的响应降低,有时也会使结构的内力和位移增大,这种相互作用对结构动力响应有显著影响^[2-3]。

大跨桥梁跨越峡谷时,正好处于上述复杂的局部场地条件中,由上述可知,大跨结构物在跨越峡谷地形和谷地软沉积层时,其各支承输入的地震动是有很大差异的,它对整个结构物地震响应的影响将很大。王蕾、赵成刚^[4-5]给出了考虑地形效应及地震波不同波型及入射角度下刚构桥的地震反应分析,但没有考虑土-结构动力相互作用的影响。另外在结构地震响应分析中,地震波的输入是否合理对计算精度起着重要作用。传统的波动输入多采用一致激励法,即在计算中主要考虑了波动的时间特征,而没有考虑到空间变化。这对跨度不大的结构来说是可以接受的,但对于大跨度桥梁结构来说,地震发生时,由于受到行波效应、部分相干效应、

波的衰减效应及局部地形效应的影响^[6],地基各点的振动和振幅以及相位有很大的不同,因此应考虑多点输入的问题。近期不少学者对此进行了研究并取得了一系列成果。在地形效应的研究中,George D Bouckovalas^[7]分析了地震波输入下单边斜坡坡角改变对地面运动的影响;李山有^[8]等分析了地震波斜入射下断层台阶对地面运动的影响;车伟^[9]等探讨了不同角度地形参数对地震动地形效应的影响规律。但这些研究多集中在对复杂地形影响的考虑,而没有与上部结构联系起来讨论它们共同作用的影响。在考虑大跨度桥梁多点激励的研究中,项海帆^[10]在考虑行波响应的基础上,讨论了相位差效应对斜张桥地震响应的影响。Nazmy和Abdel-Chaffar^[11]通过对斜拉桥进行详细分析之后指出非一致激励可能导致响应位移和构件内力的显著增长。但已有的研究很少同时既考虑土-结构动力相互作用又考虑局部地形的影响,而搞清楚这一复杂体系的地震响应情况并建立定量分析工具和方法是抗震分析与设计的基础,有必要对这一问题进行深入研究,并提供相应的分析方法和手段。

本文在多源粘弹性人工边界理论^[12]基础上,提出并建立了土体-桥梁整体分析模型,地震波是以等效力的形式输入的。该模型充分考虑了地震波入射的不同角度、地形效应、土-结构动力相互作用等影响。文中对一5跨连续梁桥进行了地震响应分析,并讨论了P波斜入射下以上因素对结构动力响应的影响。

1 基于多源粘弹性人工边界外源输入方法

1.1 粘弹性人工边界在 ANSYS 中的实现

由粘弹性人工边界的物理意义^[13],在实际应用中,粘弹性人工边界相当于在计算模型的相应边界结点的每个方向上施加一端固定的单向弹簧和阻尼元件。在 ANSYS 计算中可用 combn14 单元模拟人工边界的切向和法向弹簧、阻尼元件,并通过 APDL 语言编写命令流的方式为计算区域统一施加人工边界,采用参数化编程可以方便地应用到不同的计算模型中去。

1.2 外源输入的等效边界法^[12]

如果用人工边界从半无限介质中切取出有限的计算区域,则准确实现波动输入的条件是在人工边界上施加的等效荷载应使人工边界上的位移和

应力与原自由场的相同。刘晶波等通过将地震波动输入问题转化为波源问题，将输入的地震动转化为等效力的方法实现了波动的输入。得到了在模型边界点所需施加等效荷载的一般计算公式：

$$\sigma_l(t) = \sigma_0(x, y, t) + C\dot{u}(x, y, t) + Ku(x, y, t) \quad (1)$$

其中： $\sigma_l(t)$ 为边界点 l 处的等效力； $\sigma_0(x, y, t)$ 连续介质中由自由场产生的应力； K 、 C 分别为粘弹性人工边界的法向、切向弹簧和阻尼系数； $u(x, y, t)$ 、 $\dot{u}(x, y, t)$ 分别为入射波场位移和速度。计算时，分别求出模型边界点所需的等效力然后施加在边界点上，即可实现波动的输入。

1.3 基于多源粘弹性人工边界 P 波斜入射下等效力计算

在传统的粘弹性人工边界应用中，通常假定振源位于模型的几何中心，且为单一振源，但在多跨桥梁、铁路路基等问题中，由于桥梁基础、轨枕是多个并且其分布的距离可能很远，因此这是一种多个内源散射问题。这种情况如果仍然采用单源散射问题的粘弹性人工边界去模拟和分析，就会产生一定的误差，故本文采用多源粘弹性边界理论建立分析模型^[13]。地震波斜入射时，会在半空间自由表面产生反射和波形转化，以入射 P 波为例，当遇到自由表面时将反射 P 波和 SV 波，如图 1 所示。由波动方程、土体的本构关系及应力状态变换公式，可得边界上等效力公式^[14](2)~式(5)，入射波和反射波到边界点时间延迟见式(6)。

$$\begin{aligned} \sigma_{lx}^{-x}(t) = & (\lambda + 2G \sin^2 \alpha)(\dot{u}_p(t - \Delta t_1) + \\ & A_1 \dot{u}_p(t - \Delta t_2) / c_p + \rho c_s \sin 2\beta A_2 \dot{u}_p(t - \Delta t_3) + \\ & K_n(u_p(t - \Delta t_1) \sin \alpha + A_1 u_p(t - \Delta t_2) \sin \alpha + \\ & A_2 u_p(t - \Delta t_3) \cos \beta) + C_n(\dot{u}_p(t - \Delta t_1) \sin \alpha + \\ & A_1 \dot{u}_p(t - \Delta t_2) \sin \alpha + A_2 \dot{u}_p(t - \Delta t_3) \cos \beta) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ly}^{-x}(t) = & G \sin 2\alpha (\dot{u}_p(t - \Delta t_1) - A_1 \dot{u}_p(t - \Delta t_2)) / c_p + \\ & \rho c_s (\sin^2 \beta - \cos^2 \beta) A_2 \dot{u}_p(t - \Delta t_3) + \\ & K_\tau(u_p(t - \Delta t_1) \cos \alpha - A_1 u_p(t - \Delta t_2) \cos \alpha + \\ & A_2 u_p(t - \Delta t_3) \sin \beta) + C_\tau(\dot{u}_p(t - \Delta t_1) \cos \alpha - \\ & A_1 \dot{u}_p(t - \Delta t_2) \cos \alpha + A_2 \dot{u}_p(t - \Delta t_3) \sin \beta) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{lx}^{-y}(t) = & G \sin 2\alpha \dot{u}_p(t - \Delta t_4) / c_p + \\ & K_\tau u_p(t - \Delta t_4) \sin \alpha + C_\tau \dot{u}_p(t - \Delta t_4) \sin \alpha \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ly}^{-y}(t) = & (\lambda + 2G \cos^2 \alpha) \dot{u}_p(t - \Delta t_4) / c_p + \\ & K_n u_p(t - \Delta t_4) \cos \alpha + C_n \dot{u}_p(t - \Delta t_4) \cos \alpha \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \Delta t_1 = y \cos \alpha / c_p \\ \Delta t_2 = (2L - y) \cos \alpha / c_p \\ \Delta t_3 = (L - y) / c_s \cos \beta + \\ \quad (L - (L - y) \tan \alpha \tan \beta) \cos \alpha / c_p \\ \Delta t_4 = x \sin \alpha / c_p \end{cases} \quad (6)$$

其中：等效地震荷载的下标代表节点号和分量方向，上标代表节点所在人工边界面的外法线方向，与坐标轴方向一致为正，相反为负； λ 、 G 、 ρ 、 c_p 、 c_s 和分别为介质的拉梅常数、密度、P 波波速、S 波波速； $u_p(t)$ 、 $\dot{u}_p(t)$ 分别为入射波在边界点的位移和速度； Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 分别表示为左侧节点 l 处入射 P 波、地表反射 P 波和地表反射 SV 波的时间延迟； Δt_4 为底边节点 l 处入射 P 波的时间延迟； A_1 、 A_2 分别为 P 波、SV 波地表反射系数^[15]。

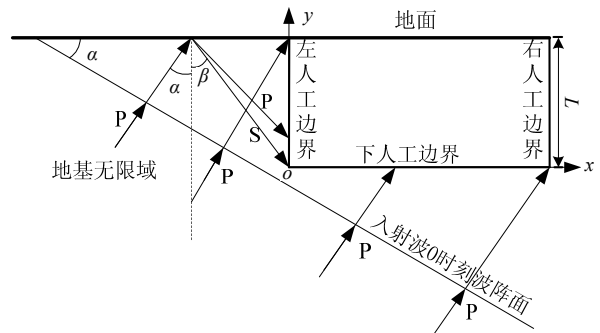


图 1 平面 P 波斜入射模型

Fig.1 reflection model of P wave

2 多跨连续梁桥地震动力响应模型的建立与数值分析

对一 5 跨连续梁桥建立了整体分析模型，见图 2，实际桥长 300m，主桥跨度组合为 5×60m。这一整体分析模型可以充分考虑地震波入射角度的不同、地形效应和土-结构动力相互作用等影响。桥梁主梁与桥墩的截面及桥梁群桩基础见图 3，箱形梁采用 C50 混凝土，桥墩采用 C30 混凝土；桥梁所有基础均采用 2×3 的群桩基础，桩直径为 0.5m，桩长 16m，密度 $\rho=2500\text{kg/m}^3$ ，弹性模量 $E_p=155.76\text{GPa}$ ；地基土层的密度 $\rho=2000\text{kg/m}^3$ ，泊松比 $\nu=0.4$ ，剪切模量 $G=45.5\text{MPa}$ ，阻尼比为 0.05。输入地震波记录为 1995 年阪神地震的 KOBE 波上下向记录，持续时间为 40s，其加速度时程见图 4，分别由加速度时程积分而得到在计算中使用的地震位移及速度时程。假定这一地震波是平面 P 波，

并分别以 0°、20°、40°及 60°四种角度由左下方向上斜入射。其中地震波由式(2)~式(5)按等效力输入。桥墩采用梁单元模拟，土体采用实体单元，网格尺寸 4m×4m，支座采用弹簧单元 combin14 单元模拟，单元两端分别和梁和墩固定在一起。

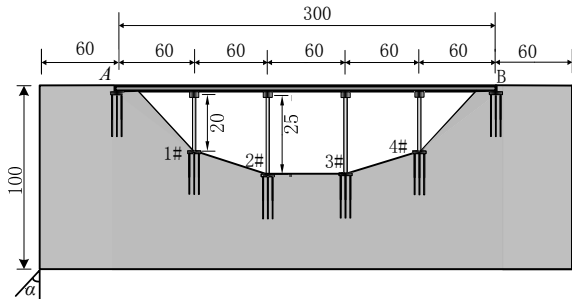


图2 桥梁结构示意图 /m
Fig.2 Sketch map of bridge

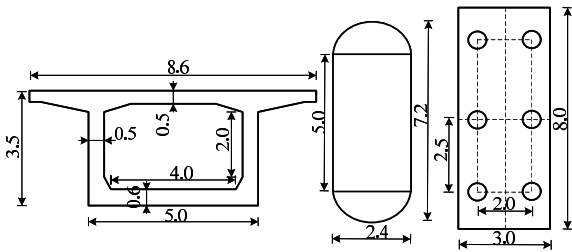


图3 梁、柱、群桩基础横截面图 /m

Fig.3 Cross-section of girders, piers and Piles groups foundation

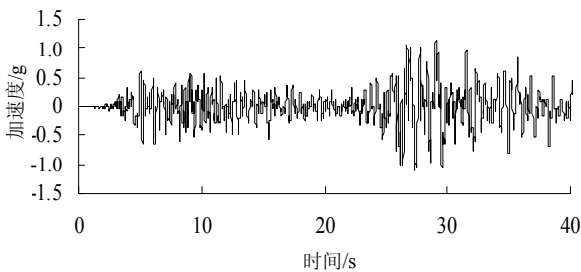


图4 地震动加速度时程

Fig.4 History of acceleration record

2.1 P波不同入射角度对桥梁动力响应的影响

地震时震源一般较深，地震波向上传播时经过由硬变软的不同岩层折射后到达地表时已接近垂直入射了，故传统的计算方法将垂直方向作为地震波的入射方向。但就一些浅源地震和岩层较为复杂的地区，入射角度对结构物在地震作用下的动力响应有一定的影响，在分析时应给予考虑。另外垂直入射时波动到达自由地面时相位相同，无法考虑行波效应的影响；而采用水平输入的地震波虽然可以考虑行波效应，但与体波入射的实际情况有一定的差别。本文采用基于粘弹性边界等效力的波动输入方法，可以方便地实现不同角度输入波。图5、图6

分别给出了在 25s~35s 间在 P 波入射角度为 0°、20°、40°及 60°时 1#~4#桥墩的内力时程。

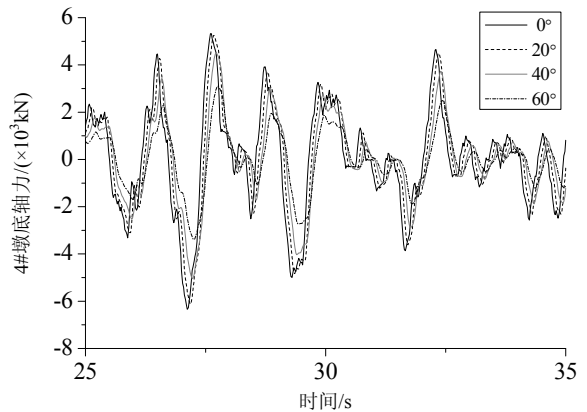
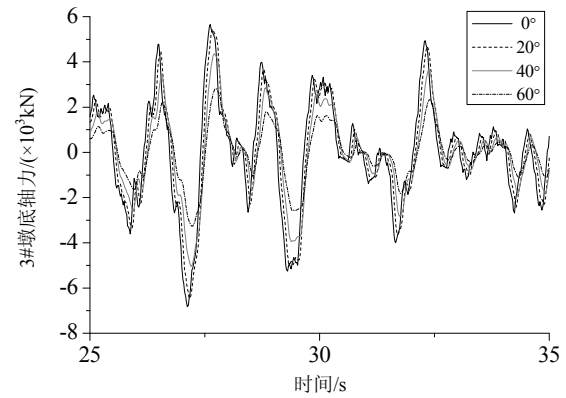
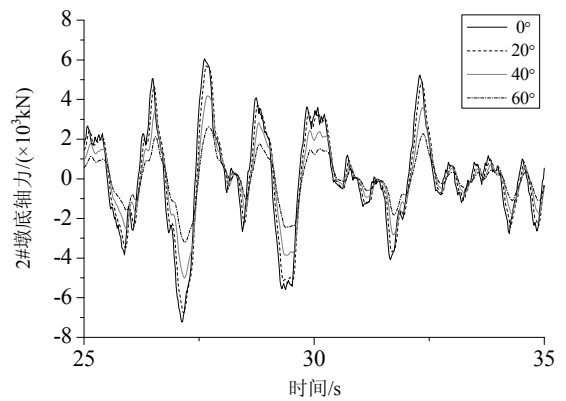
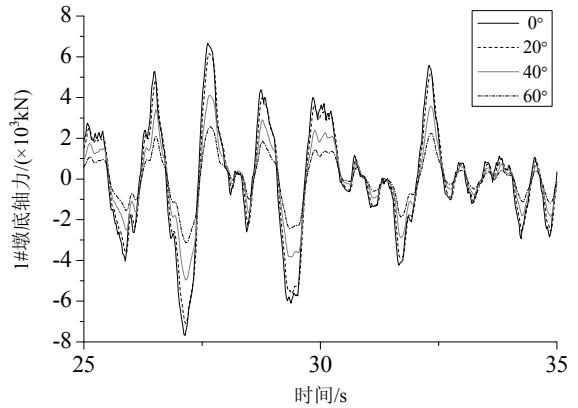


图5 1#~4#桥墩轴力时程

Fig.5 The axial force time-history curves of 1#-4# piers at different incidence angles

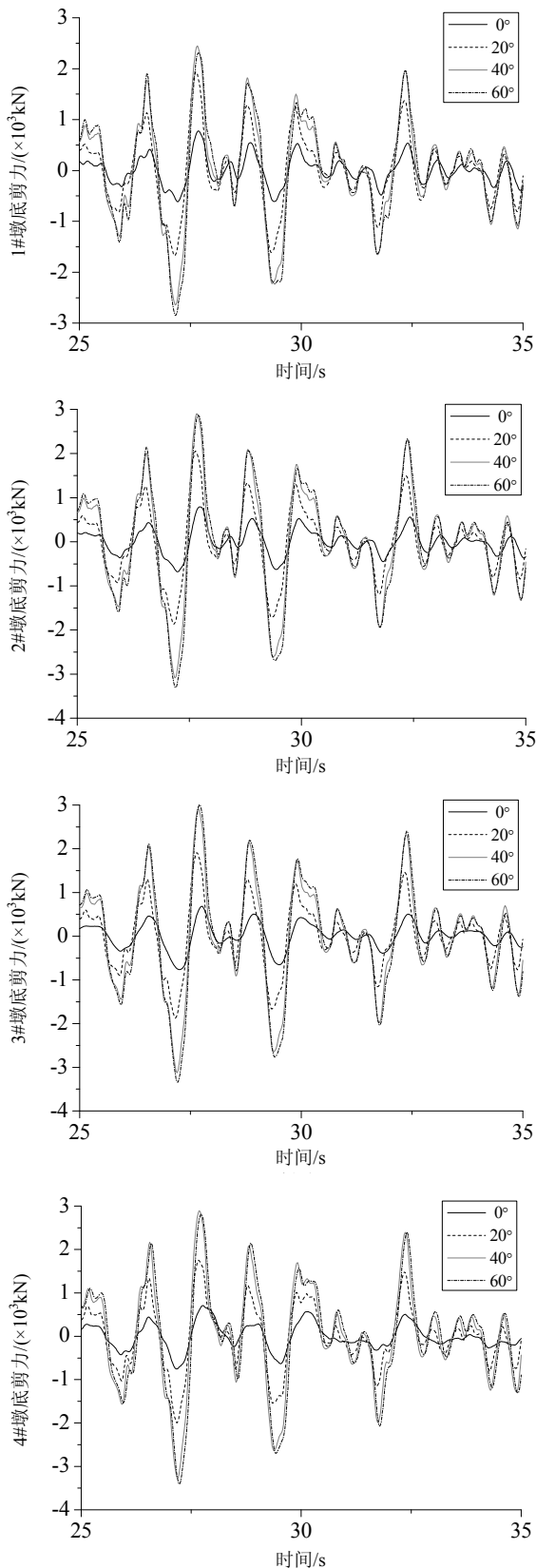


图 6 1#~4#墩底剪力时程

Fig.6 The shear force time-history curves of 1#-4# piers at different incidence angles

由图示不同角度下内力时程可知，在 1#~4#处，随着 P 波入射角度的增大，竖向加速度分量减小，

水平分量的增加，从而导致各桥墩轴力相应减小，各桥墩墩底剪力不断增大。0°时各桥墩轴力基本同时达到最大值，而剪力则最小。60°时各桥墩轴力最大值与 0°时相比约为其 50%左右。而桥墩的剪力 20°时是 0°时的 3 倍以上，并且在 0°~60°之间最大剪应力随入射角的增大而增大。大量桥梁震灾表明，强震时桥墩的震害主要包括桥墩的断裂、剪断。而传统的仅考虑地震波垂直入射的桥梁动力响应可能过小地考虑桥墩墩底的剪应力，使结构偏于不安全，故在桥梁抗震分析时充分考虑地震波入射角度的影响是必要的。

2.2 地形效应对桥梁动力响应的影响

地震发生时，地震波在向上传播的过程中由于遇到不规则地形将会发生复杂的反射和散射，地震动场中不同位置地震波叠加方式不同，从而导致了在局部地区地表运动的放大。为了定量分析地形放大效应，我们采用了考虑与不考虑地形效应影响的两种分析模型。在不考虑地形效应影响的模型中把模型的上表面取为自由水平表面；然后把考虑地形效应影响的本文模型各参考点的加速度最大值与不考虑地形效应影响的模型中在自由水平面上相应点的加速度最大值的比值作为地形效应影响系数 α 。各参考点竖向向地形影响系数 α_v 和水平向地形影响系数 α_h 见表 1。由表 1 可知，在 0°~60°时在桥台 A, 1#桥墩及桥台 B 处加速度值有明显的增大，说明由于地形的影响在迎波面地形突变处由于入射和散射波的叠加造成地表运动的放大，在谷底的 2#~4#桥墩处，加速度则有所减小。同时，角度的变化对地形效应也有一定的影响，从表 1 中可以看出，随着角度的增大，同一桥墩处地形效应有所减小。对于河谷地形，在河肩处有明显的地形放大效应，在桥梁抗震设计中应予重视。

表 1 各参考点加速度地形影响系数 α

Table 1 The peak acceleration ratio α of bridge supports with and without topographic effect

入射角度	桥台 A		1#墩底		2#墩底	
	α_v	α_h	α_v	α_h	α_v	α_h
0°	1.725	—	1.442	—	1.031	—
20°	1.521	3.992	1.214	3.658	0.904	3.337
40°	1.276	2.889	1.135	2.537	0.862	2.256
60°	1.143	2.167	0.954	1.934	0.846	1.602
入射角度	3#墩底		4#墩底		桥台 B	
	α_v	α_h	α_v	α_h	α_v	α_h
0°	0.843	—	0.921	—	1.275	—
20°	0.793	3.174	0.825	3.264	1.174	3.552
40°	0.738	2.098	0.794	2.165	1.204	2.464
60°	0.687	1.295	0.775	1.424	1.057	1.725

2.3 土-结构动力相互作用对桥梁动力响应的影响

本文首先采用考虑土-结相互作用(SSI)和地形影响的整体法对桥梁动力响应进行了分析。然后按文献[7]方法在不考虑 SSI 作用时对同样情况进行了计算,即先计算图 2 给出的自由场地的时程响应,然后将其作为桥墩和桥台地震动的输入并对桥梁进行了计算分析。而后对这两种分析方法的计算结果进行比较。在计算中,为了考虑土体软硬对 SSI 作用的影响,分别按原土体参数和将土体弹性模量 E_s 提高一倍后两种情况进行了计算。表 2 为 1#~4# 桥墩在两种情况下的水平向最大位移,其中 A_1 、 B_1 表示表 1 参数下考虑和不考虑 SSI 作用时桥墩的最大相对位移; A_2 、 B_2 表示土体弹性模量 E_s 提高一倍后考虑和不考虑 SSI 时桥墩的最大相对位移,其计算结果见表 2。由表 2 可知,在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 两种不同物理参数时,各个桥墩在不考虑 SSI 作用下的计算结果都比考虑其影响的整体法计算结果要小。在进行结构设计时这种情况偏于不安全,因此 SSI 作用不容忽视。同时由于土体弹性模量的增大各桥墩的相对位移有所减小,为了定量评价土体软硬对 SSI 的影响,记 SSI 影响率 $\kappa=(A_i-B_i)/A_i$, A_i 与 $B_i(i=1,2)$ 的定义同前。图 7 为两种物理参数下 SSI 对桥墩相对位移影响率,由图 7 可知,随着土体的变硬,SSI 对桥梁动力响应的影响减弱,由于软土对 SSI 作用有较大的影响,在桥梁选址和抗震分析时应予以考虑。

表 2 两种土体物理性质下考虑与不考虑土-结构相互作用下各参考点最大水平向相对位移

Table 2 X-maximum relative displacement of bridge supports with and without SSI effect considering different soil physical properties

入射角	0°				20°			
	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#
A_1/cm	3.554	3.570	3.528	3.804	3.323	3.544	3.617	3.956
B_1/cm	2.941	3.028	2.862	3.048	2.674	2.940	3.138	3.161
A_2/cm	3.206	3.214	3.177	3.432	3.080	3.482	3.361	3.620
B_2/cm	2.747	2.883	2.651	2.942	2.628	2.930	3.001	3.123
入射角	40°				60°			
	1#	2#	3#	4#	1#	2#	3#	4#
A_1/cm	2.429	3.330	3.604	3.875	2.534	3.294	3.504	3.331
B_1/cm	1.975	2.778	2.866	2.955	2.080	2.721	2.769	2.519
A_2/cm	2.234	2.902	3.277	3.429	2.168	2.776	2.927	2.792
B_2/cm	1.914	2.538	2.373	2.397	1.831	2.321	2.500	2.333

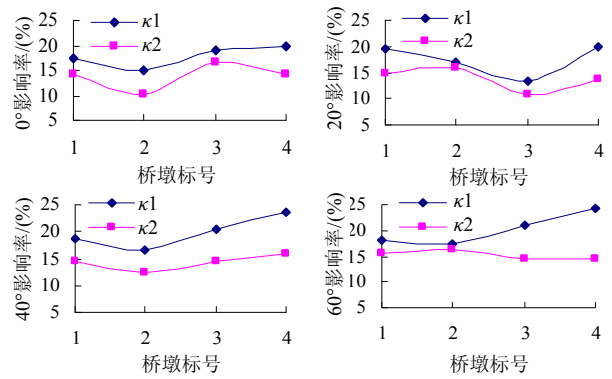


图 7 不同土体物理参数下土-结构动力相互作用对桥墩相对位移的影响率

Fig.7 X-maximum relative displacement ratio κ of bridge supports with SSI considering different soil physical properties

3 结论

本文基于多源粘弹性人工边界地震波等效力输入理论,在同时考虑土-结构动力相互作用,局部地形效应及地震 P 波不同角度入射下对一建于跨越河谷地形的 5 跨连续梁桥进行了全桥整体动力响应分析,结果表明:随着入射角度的增加,结构在竖向动力响应减小而水平向的动力响应明显增大,其中 $0^\circ\sim 20^\circ$ 之间墩底水平向剪力有显著增大;由于局部地形效应的影响,在左侧桥台 A 及 1#墩处结构的动力响应有显著的增大,而在谷底处结构的动力响应有所减小,同时入射角度对地形效应也有一定的影响,地震波入射角度越小,地形效应越显著,在桥梁设计分析时应重视;考虑土-结构动力相互作用时各桥墩水平向最大相对位移较不考虑时大 15%~25%,说明地震时土-结构动力作用对结构的动力响应有较大的影响,不考虑偏于不安全;同时土体的物理性质对土-结构动力相互作用对桥梁动力响应有一定的影响。因此,在复杂地形条件下的多跨高架桥梁地震反应分析中,以上因素应予以考虑。本文的分析结果可供抗震设计参考。

参考文献:

[1] Singh S K, Mena E, Castro R. Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan Earthquake and ground motion amplification in and near Mexico city from strong motion data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78(2): 451—477.

[2] Wu Shiming, Gan Gang. Dynamic Soil – structure interaction for high-rise building [J]. Developments in Geotechnical Engineering, 1998, 83: 203—216.

- [3] Wu Jingning. Seismic effectiveness of tuned mass dampers considering soil-structure interaction [J]. *Earthquake Engineering and Structure Dynamic*, 1999, 28(11): 1219—1233.
- [4] 王蕾, 赵成刚, 王智峰. 考虑地形影响和多点激励的大跨高墩桥地震响应分析[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(1): 50—53.
Wang Lei, Zhao Chenggang, Wang Zhifeng. Seismic response analysis of continuous rigid-framed bridge with high piers considering topographic effects and multi-support excitations [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(1): 50—53. (in Chinese)
- [5] 王蕾, 赵成刚, 屈铁军. SV 波入射下地形条件对大跨钢构桥地震响应的影响[J]. *地震学报*, 2008, 30(3): 307—314.
Wang Lei, Zhao Chenggang, Qu Tiejun. Seismic response of long-span rigid-framed bridge to incident SV wave with topographic effect being considered [J]. *Acta Seismol Ogica Sinica*, 2008, 30(3): 307—314. (in Chinese)
- [6] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点地震动合成(II): 合成实例[J]. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(2): 25—32.
Qu Tiejun, Wang Qianxin. Simulation of spatal correlative time histories of multi-point ground motion, part II: Application of fundamental formulas [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1998, 18(2): 25—32. (in Chinese)
- [7] George D Bouckovalas, Achilleas G Papadimitriou. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25: 547—558.
- [8] 李山有, 马强, 韦庆海. 地震体波斜入射下的断层台阶地震反应分析[J]. *地震研究*, 2005, 28(3): 277—281.
Li Shanyou, Ma Qiang, Wei Qinghai. Seismic response analysis of fault step subjected to obliquely incident body wave [J]. *Journal of Seismological Esearch*, 2005, 28(3): 277—281. (in Chinese)
- [9] 车伟, 罗奇峰. 复杂地形条件下地震波的传播研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(9): 1333—1337.
Che Wei, Luo Qifeng. Seismic wave propagation in complex topography [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(9): 1333—1337. (in Chinese)
- [10] 项海帆. 斜张桥在行波作用下的地震反应[J]. *同济大学学报*, 1983(3): 1—9.
Xian Haifan. Earthquake response analysis of cable-Stayed bridges under the action of travelling waves [J]. *Journal of Tongji University*, 1983(2): 1—9. (in Chinese)
- [11] Nazmy A S, Abdel-Ghffor A M. Effect of ground motion spatial variability on the response of cable-stayed bridges [J]. *EESD*, 1992, 121: 1—20.
- [12] 郜新军, 赵成刚, 张延. 多源散射叠加粘弹性人工边界探究及在桥梁工程中的应用[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(11): 131—138.
Gao Xinjun, Zhao Chenggang, Zhang Yan. A study of viscous-spring superposition artificial boundary for multi-sources scattering problem and its application in bridge engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(11): 131—138. (in Chinese)
- [13] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. *土木工程学报*, 1998, 31(3): 55—64.
Liu Jingbo, Lu Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1998, 31(3): 55—64. (in Chinese)
- [14] 杜修力. *工程波动理论与方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Du Xiuli. *Theories and methods of wave motion for engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 陈国兴. *岩土地震工程学*[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Chen Guoxin. *Geotechnical earthquake engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)