

文章编号: 1000-7598(2014)增1-414-09

确定大跨连续刚构桥地震动输入时程方法比较

罗 超¹, 楼梦麟¹, 桂国庆²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 井冈山大学 建筑工程学院, 江西 吉安 343009)

摘 要: 以上海某大跨度连续钢构桥梁的场地为例, 讨论动水压力对河谷场地土层地震响应的影响, 通过对建筑结构抗震规范反应谱生成时程, 采用一维、二维模型分别计算得到场地地震动输入时程。对比可以看出, 考虑动水压力将会大大减小场地的竖向地震动反应, 而动水压力对水平向的地震响应影响不大; 反应谱生成时程的方法与一维模型计算得到的时程均与采用考虑场地地形变化的二维模型的计算结果有较大的区别; 二维模型计算得到的时程反应谱的卓越周期超出规范反应谱的平台段。最后, 讨论了河谷场地对周围场地的影响范围, 结果表明河水及河谷对周围场地水平方向的影响范围是沿河谷外侧 5 倍土层深度或 140 倍河谷深度, 在该范围内的建筑物均应考虑河谷的影响。

关 键 词: 地面运动; 地震反应; 河谷地形; 动水压力

中图分类号: P 315.61

文献标识码: A

Comparing time history methods of input ground motion for large span continuous rigid frame bridge

LUO Chao¹, LOU Meng-lin¹, GUI Guo-qing²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Jinggangshan University, Ji'an, Jiangxi 343009, China)

Abstract: Based on a site of a large span continuous rigid frame bridge in Shanghai, the influence of hydrodynamic pressures on ground motion is discussed. The input ground motion has been obtained by using the response spectrum of code, one-dimension model and two-dimension model. It shows that hydrodynamic pressures can reduced the vertical acceleration response significantly, while it has little effect on horizontal acceleration response. The ground motion calculated by two-dimension model which consider the topography is quite different from that of other two models. The predominant periods of input ground motion calculated by two-dimension model exceeds the flat section of response spectrum of code. Finally, the influence range of valley topography is discussed, which shows that the influence region in the direction normal to the river is no more than 5 times of soil layer thickness or 140 times of deepness of the river valley. Any structures in this region should take river valley influence into consideration.

Key words: ground motion; seismic response; valley topography; hydrodynamic pressures

1 引 言

复杂场地条件下地震动的空间变化对桥梁结构, 尤其是大跨度桥梁结构的响应不可忽视^[2]。对于重要工程, 我国《工程场地评价规范》^[1]要求开展工程场地地震安全性评价, 以合理地确定工程结构的输入地震动参数。如何在大型桥梁结构工程的地震安全性评价工作中合理给出考虑地震动空间变化的地震动时程非常重要。通常情况下, 由于土层通常具有水平分层的特点, 将土层简化为一维波动问

题进行分析。桥梁是跨河谷的线状建筑物, 河谷场地的地形和地质条件不规则, 在此种情况下将土层简化为一维波动问题难以满足要求。研究表明^[3-5], 在河谷、陡坎等地形情况下采用一维方法进行计算, 无法考虑由地形引起的竖向地震动分量, 难以满足计算要求, 宜建立二维模型进行分析。河谷场地常常有河水的存在, 会影响场地的地震动输入, 而以往土层地震反应分析中通常没有考虑河水的影响。本文以上海一大跨度连续刚构桥梁的场地为例, 以工程场地实际状况进行二维土层地震反应分析, 并

收稿日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 90915011)。

第一作者简介: 罗超, 男, 1987 年生, 博士研究生, 从事土-结构动力相互作用方面的研究。E-mail: 365thinking@tongji.edu.cn

通讯作者: 楼梦麟, 男, 1947 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗震方面的研究。E-mail: lml@tongji.edu.cn

与常规一维土层分析结果相比较，研讨场地不规则性和河水对场地地震反应的影响。

2 基本理论

2.1 土层地震反应计算方程

考虑河谷、陡坎等复杂地形，由于解析方法无法适应地质分层的地形变化和土层不均匀分布的影响，目前主要采用有限单元法进行数值分析，为此必须采用有限范围的土层模拟半无限的实际场地。对于二维模型要引入两侧的竖向人工边界和水平人工边界，根据现有研究^[6]，在外源激励下土层地震反应分析中远置边界易于实施且计算结果可靠。本文将半无限土体离散化后得到有限元模型，远置边界至于桥墩外侧 5 倍土层厚度处，底部采用刚性约束，土中的阻尼模型采用滞后阻尼模型，假定基岩面上地震动输入为一致时土层在时域运动方程为

$$M\ddot{\mathbf{u}}_d(t) + (1 + i2\xi)\mathbf{K}\mathbf{u}_d(t) = -M\mathbf{I}\ddot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (1)$$

式中： M 、 K 分别为土层在有限元离散后得到的质量矩阵和刚度矩阵； ξ 为滞后阻尼比； I 为单位列阵，其元素为 0 和 1，表示地震运动在各自由度上的作用效应； $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ 为输入地震波时程； $\mathbf{u}_d(t)$ 为地震作用所引起的各节点相对于基岩面的位移向量。土层中各节点的绝对加速度 $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 和绝对位移 $\mathbf{u}(t)$ 可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\mathbf{u}}(t) &= \ddot{\mathbf{u}}_d(t) + \mathbf{I}\ddot{\mathbf{u}}_g(t) \\ \mathbf{u}(t) &= \mathbf{u}_d(t) + \mathbf{I}\mathbf{u}_g(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在 0 初始条件下，对式 (1) 作 Fourier 变换，可得频域运动方程：

$$[-\omega^2 M + (1 + i2\xi)K]U_d(\omega) = -MIA(\omega) \quad (3)$$

$A(\omega)$ 与 $\ddot{\mathbf{u}}_g$ 为 Fourier 变换对，即

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{\mathbf{u}}_g(t) \exp(-i\omega t) dt \\ \ddot{\mathbf{u}}_g(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

通过在频域求解式 (3)，即可得到土层各点在不同频率下的相对位移复反应，随之可得到土层各点在不同频率下的相对速度、相对加速度等反应量的复反应。再利用 FFT 逆变换即可求得时域内土层各点的相对加速度、相对位移等反应时程，代入式 (2) 可求得时域绝对加速度和绝对位移时程。

2.2 河水动水压力求解

河谷工程场地和普通陆地工程场地地震响应分析的不同之处在于河床上覆河水在地震作用下土体会受到河水运动的影响。本文根据张如林^[7]的研究成果，采用动水压力等效质量模型，探讨地震作用时河水对河床的影响。

对于横向均匀场地，流体作用于场地地表面法向的动水压力等于场地单位面积上流体质量与场地表面加速度之积，即

$$p = -\rho h \ddot{u}(t) \quad (5)$$

式中： ρ 、 h 、 $\ddot{u}(t)$ 分别为流体的密度、场地覆水深度和场地表面法向加速度。

由式 (5) 求得的水土交界面各位置点的动水压力 p ，用有限元计算模型就可以计算河床表面各节点处的附加质量值，计算公式为

$$m_i = p_i A_i \quad (6)$$

式中： p_i 为河床表面 i 节点位置处的动水压力值； A_i 为节点 i 的控制面积。

由于动水压力的方向是沿着土层与水体交界面的法向，由式 (6) 求得的附加质量值 m_i 沿着土层和水体交界面的方向。因此，此质量单元应根据交界面的方向确定包括水平和竖向两个方向的附加质量。

2.3 考虑土层非线性的简化方法

由于土体是一种非线性性质很强的材料，在工程场地地震反应计算中需要考虑土体的非线性性质。等效线性化方法^[8]是一种近似考虑土体非线性性质的方法，通过土体的弹性模量 E (或剪切模量 G) 和等效阻尼比 λ 这 2 个参数来反映土动应力-动应变关系的非线性与滞后性 2 个基本特征，且将弹性模量与阻尼均表示为应变幅的函数。Hardin 等^[9]提出了 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D/D_{\max} - \gamma$ 之间关系的经验公式：

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}}; \quad \frac{D}{D_{\max}} = \frac{\gamma/\gamma_r}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (7)$$

式中： G_{\max} 、 D_{\max} 分别为最大动剪切模量和最大阻尼比，通过试验或者经验公式确定； $\gamma_r = \tau_{\max} / G_{\max}$ ； γ 为动剪应变； G 为剪切模量； D 为阻尼比。

3 场地概况

本文计算的河谷宽 187 m，河左岸坡度为 1: 0.66，河右岸坡度为 1: 1.14，河谷深 9.06 m，见图 1。河谷两侧各有一个波速钻孔 B1 和 B2，钻孔试验所得深度 105.2 m 以内土层地质资料见表 1，其等效线性化模型土的剪切模量和阻尼比随剪应变

变化的取值如图2所示。此场地基岩深度为250m,土层向下取至250m。105.2m以下的土层资料据统计资料^[10]取值, $G_{max} = 32.5 + 3(z - 15)$ MPa。其等效线性化参数取为经验参数, 剪切模量和阻尼比随剪应变变化如图3所示, 输入地震特性如图4所示。

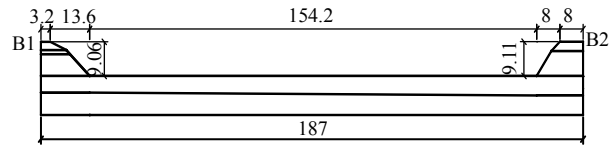


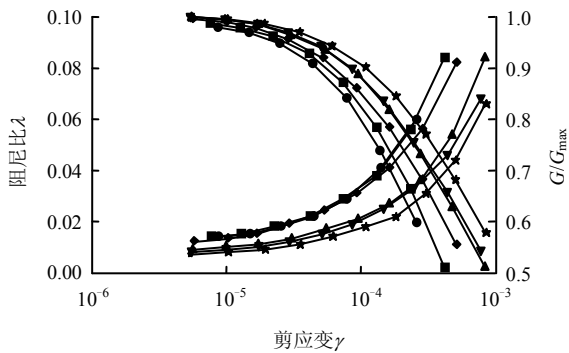
图1 河谷剖面图 (单位: m)

Fig.1 Section drawing of river valley (unit: m)

表1 B1和B2钻孔土层地质参数

Table 1 Soil parameters of B1 and B2 drilling holes

层号	取土深度/m		土层名称	密度 /(kg/m ³)	泊松比	动剪切模量 /MPa	动弹性模量 /MPa
	B1	B2					
①	2.2	2.5	填土	1810	0.41	25	69
②	3.3		粉质黏土	1810	0.41	26	74
③	13.5	12.5	粉质黏土	1830	0.41	29	81
④	19.5	19.5	淤泥质黏土	1710	0.41	31	87
⑤	22.3	21.3	粉质黏土	1870	0.38	44	121
⑥	25.4	24.3	粉质黏土	1930	0.38	111	306
⑦ ₁₋₁	29.0	29.7	砂质粉土	1850	0.33	132	351
⑦ ₁₋₂	37.0	35.0	粉砂	1860	0.33	163	433
⑦ ₂	57.0	58.0	细砂	1900	0.33	226	602
⑧ ₁₋₁	62.6	61.6	粉质黏土	1930	0.38	270	745
⑧ ₁₋₂	66.5	66.0	粉质黏土	1960	0.38	319	881
⑧ ₁₋₃	73.0	72.7	黏土	1810	0.38	224	619
⑨	82.2	81.7	砂质粉土	1900	0.33	311	827
⑩	95.0	94.3	粉质黏土	1880	0.38	337	931
⑪	105.2	105.2	粉砂夹粉质黏土	1950	0.33	393	1046



(a) B1 钻孔土



(b) B2 钻孔土

图2 G/G_{max} 和 λ 随 γ 变化曲线

Fig.2 Values of G/G_{max} with γ

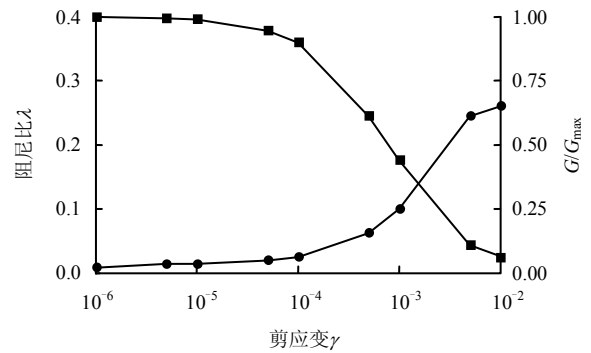


图3 土 G/G_{max} 和 λ 随 γ 的经验变化曲线

Fig.3 Empirical values of G/G_{max} with γ

分析问题时,一般先根据预估剪应变幅大小,假定 G 、 λ 值,以求出土层的平均剪应变,后由上述关系计算出相应的 G 、 λ 值,再进行线性计算,如此反复迭代,直到相邻2遍的误差允许时为止,实质为通过多次的线性计算调整土层的参数以反映土的非线性性质。

计算时,输入地震波为50年设计基准期10%超越概率双向人工基岩波,对应的峰值加速度为 0.821 m/s^2 ,其水平及竖向加速度时程傅里叶谱和反应谱如图4所示。

根据以上资料，建立土层的二维有限元模型。根据潘旦光^[11]的研究结果，有限元网格竖向最大尺寸应满足 $h \leq \lambda_{\min} / 8$ ，其中 λ_{\min} 为分析过程中的最小波长，土层二维有限元模型见图 5。

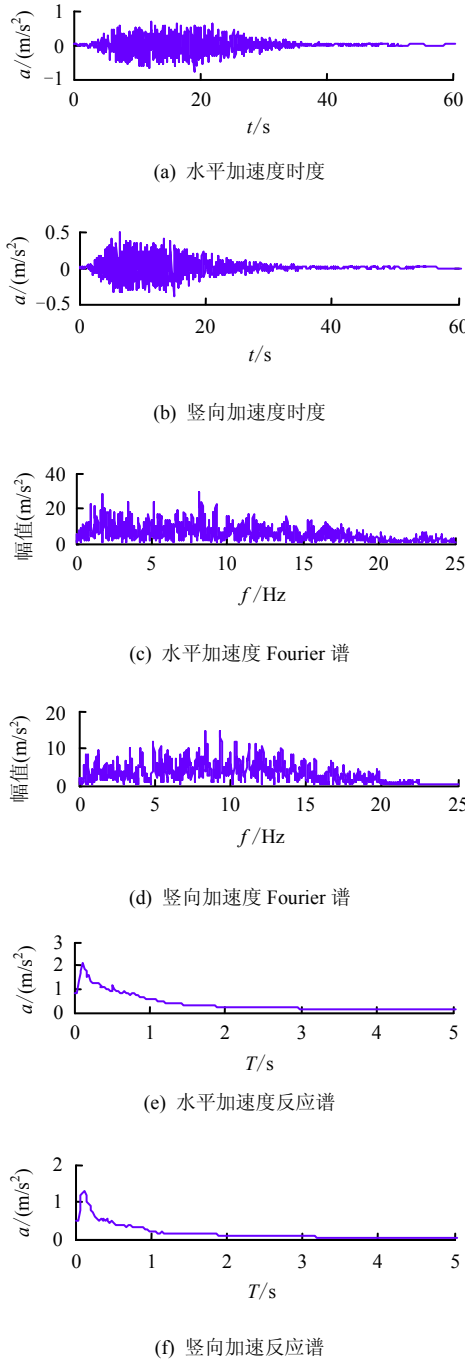


图 4 输入地震动特性

Fig.4 Character of input ground motion

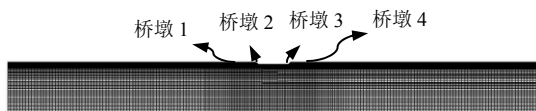


图 5 土层二维有限元模型

Fig.5 Finite element model of soil

4 多点地震动场计算结果

4.1 河水对桥梁多点地震动输入计算结果的影响

根据式 (6)，将河水动水压力转化为附加质量，分别计算考虑河水影响和不考虑河水影响的情况下的大跨度连续刚构桥场地的多点地震动时程。土层下卧基岩面上采用一维地震输入模型。计算结果取桥墩处 4 个点的水平与竖向的加速度、速度、位移计算结果，见表 2。以考虑河水影响的情况为“精确解”，不考虑河水影响的误差见表 3。误差 e 计算公式为

$$e = \frac{r_{\text{无}} - r_{\text{有}}}{r_{\text{有}}} \times 100\% \quad (8)$$

当 $e > 0$ 时，表明当河水存在时，若不考虑河水影响，将高估场地地震反应，反之则低估场地地震反应。

表 2 各桥墩点处加速度，速度，位移峰值统计表
Table 2 Peak acceleration, velocity, and displacement values of each pier location

工况	桥墩	加速度峰值 / (m/s ²)		速度峰值 / (m/s ²)		位移峰值 / cm	
		水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向
单向地震动 输入有水	1	0.796	0.182	0.134	0.015	3.388	0.151
	2	0.839	0.115	0.144	0.012	3.847	0.189
	3	0.861	0.152	0.149	0.016	3.919	0.256
	4	0.799	0.179	0.131	0.014	3.311	0.156
单向地震动 输入无水	1	0.875	0.206	0.136	0.019	3.501	0.233
	2	0.869	0.223	0.120	0.021	3.216	0.248
	3	0.831	0.219	0.126	0.021	3.291	0.219
	4	0.884	0.186	0.134	0.015	3.447	0.134
双向地震动 输入有水	1	0.844	0.647	0.131	0.048	3.206	0.634
	2	0.845	0.312	0.141	0.038	3.786	0.662
	3	0.851	0.301	0.146	0.029	4.020	0.535
	4	0.776	0.794	0.131	0.047	3.585	0.646
双向地震动 输入无水	1	0.903	0.752	0.135	0.046	3.432	0.651
	2	0.922	0.765	0.122	0.043	3.276	0.635
	3	0.904	0.837	0.131	0.042	3.233	0.656
	4	0.868	0.806	0.134	0.046	3.544	0.642

表 3 不考虑动水压力误差表
Table 3 Errors without considering hydrodynamic pressures

工况	桥墩	加速度峰值误差 / %		速度峰值误差 / %		位移峰值误差 / %	
		水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向
单向	1	9.94	13.00	1.28	24.76	3.34	54.14
	2	3.56	94.22	-16.13	77.71	-16.42	30.83
	3	-3.48	44.48	-15.45	33.69	-16.03	-14.14
	4	10.64	4.07	2.40	7.26	4.12	-13.96
双向	1	6.90	16.20	3.46	-4.59	7.06	2.68
	2	9.09	144.80	-13.56	13.77	-13.49	-4.18
	3	6.18	177.81	-10.10	41.51	-19.57	22.76
	4	11.81	1.53	2.66	-2.46	-1.13	-0.67

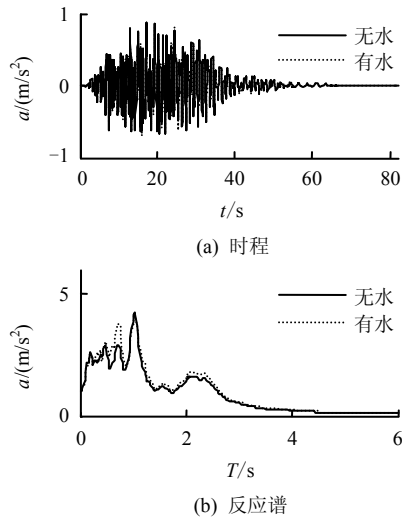


图6 单向输入桥墩1处水平加速度地震反应
Fig.6 Horizontal acceleration of pier 1 with one direction input

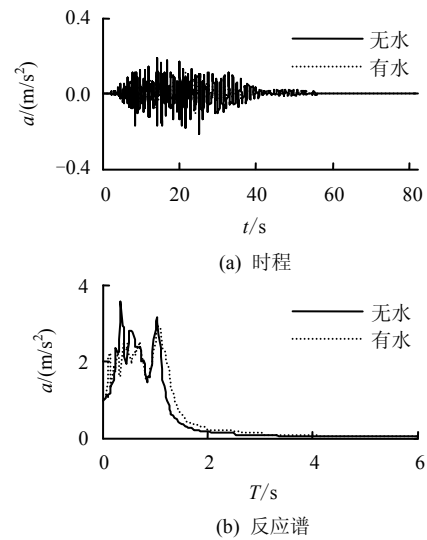


图9 单向输入桥墩2处竖向加速度地震反应
Fig.9 Vertical acceleration of pier 2 with one direction input

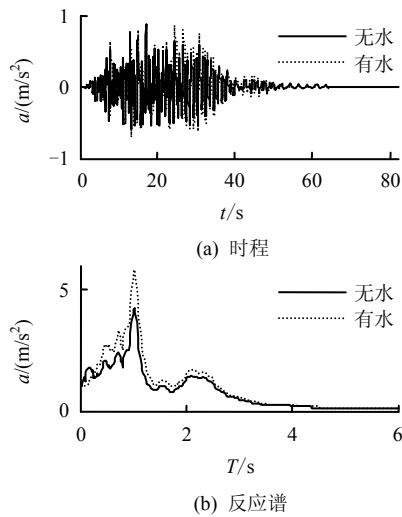


图7 单向输入桥墩2处水平加速度地震反应
Fig.7 Horizontal acceleration of pier 2 with two direction input

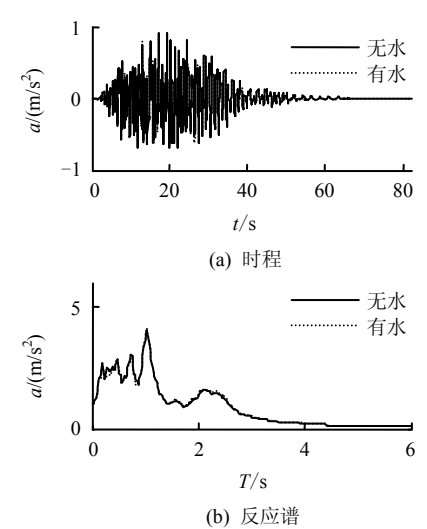


图10 双向输入桥墩1处水平加速度地震反应
Fig.10 Horizontal acceleration of pier 1 with two direction input

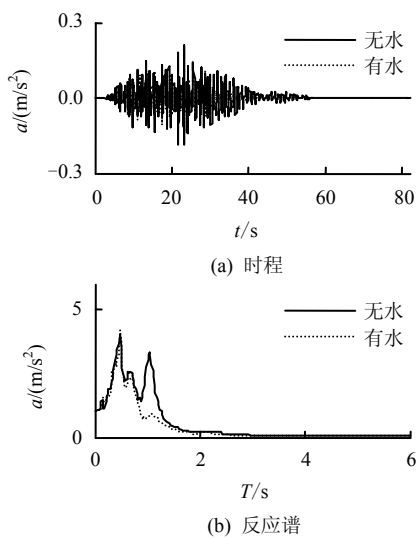


图8 单向输入桥墩1处竖向加速度地震反应
Fig.8 Vertical acceleration of pier 1 with one direction input

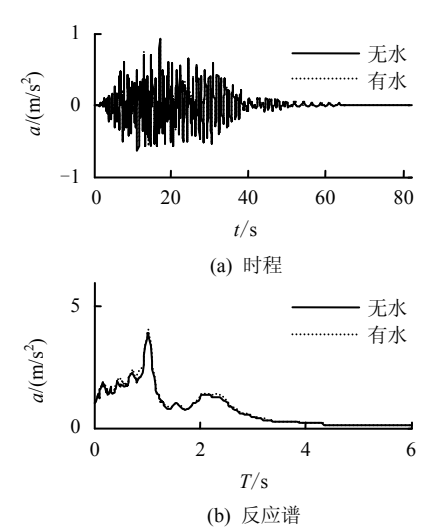


图11 双向输入桥墩2处水平加速度地震反应
Fig.11 Horizontal acceleration of pier 2 with two direction input

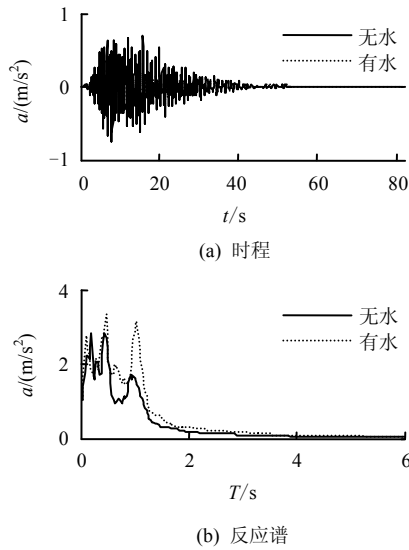


图 12 双向输入桥墩 1 处竖向加速度地震反应
Fig.12 Vertical acceleration of pier 1 with two direction input

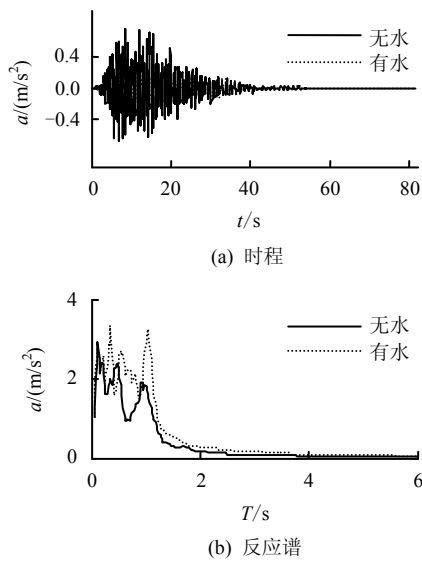


图 13 双向输入桥墩 2 处竖向加速度地震反应
Fig.13 Vertical acceleration of pier 2 with two direction input

由表 2 中的峰值响应变化情况可以看出, (1)无论是双向地震动输入还是单向地震动输入, 不考虑河水的动力影响时各桥墩处的加速度响应除了在单向输入时桥墩 3 处水平加速度响应减小了 3.48%外, 均高估了峰值加速度反应, 水平响应误差最大为 11.81%, 竖向响应误差最大为 177.81%, 表明河水对场地竖向地震响应的影 响要大于对水平地震反应的影响; (2) 从反应谱的比较可见, ①周期 $T \geq 1.5$ s 时, 有水和无水的反应谱值几乎一致, 河水对长周期分量影响甚微; ②单向输入时, 水平加速度反应

谱除了在桥墩 2 处 $T = 0 \sim 0.28$ s 之间不考虑河水会高估土层地震响应外, 其余部分在不考虑河水时会低估地震响应; 双向输入时, 是否考虑河水在整个周期范围内区别很小; ③不考虑河水时在周期 $T \geq 0 \sim 2$ s 区间内竖向加速度反应谱会显著高估地震响应。

4.2 不同计算方法的地震动场计算结果对比

本文采对比了 3 种方法计算本场地的地震动输入时程:

- (1) 依据《建筑抗震规范》^[12]中本工程场地的设计反应谱, 生成地震动场地地表输入时程。
- (2) 建立场地土的一维有限元模型, 输入场地安评报告中的人工基岩波, 计算地震动场地地表输入时程。
- (3) 建立场地土的二维有限元模型, 同样输入安评报告中的人工基岩波, 计算地震动场地地表输入时程。

绘制 3 种方法生成的地震动输入时程曲线如图 14~17 所示。其中, 方法 3 为 2 个桥墩处的地震动输入时程。图 18 为 3 种方法的 Fourier 谱对比 (反应谱曲线为土层计算曲线), 图 19 为 3 种方法的反应谱对比。

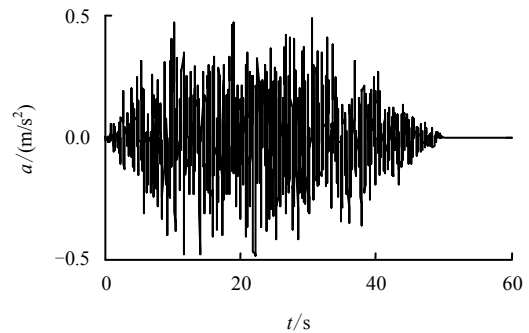


图 14 反应谱生成时程
Fig.14 Time history generated by response spectrum

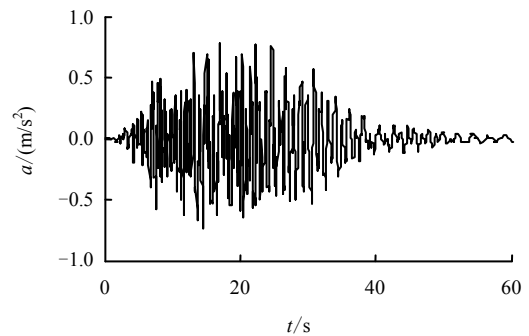


图 15 一维模型计算时程
Fig.15 Time history calculated by 1-demenion model

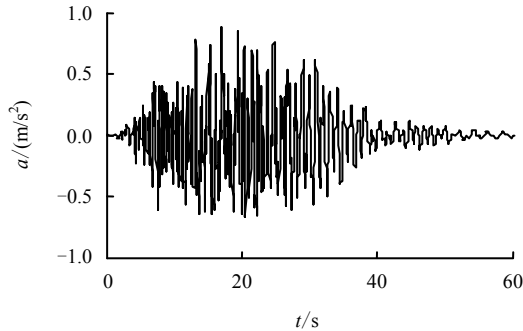


图 16 二维模型桥墩 1 处水平加速度时程
Fig.16 Horizontal time history calculated by 2 demension model of pier 1

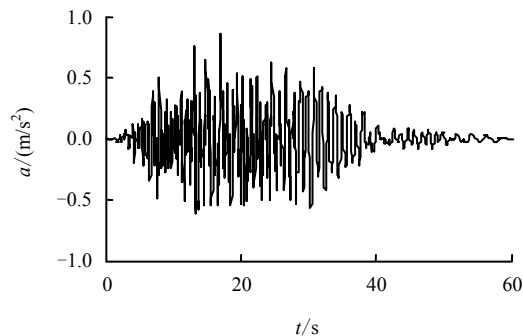


图 17 二维模型桥墩 2 处水平加速度时程
Fig.17 Horizontal time history calculated by 2 demension model of pier 2

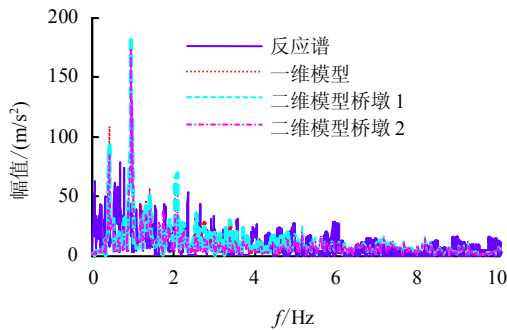


图 18 3 种方法水平地面运动 Fourier 谱对比
Fig.18 Fourier spectra of horizontal acceleration calculated by three methods

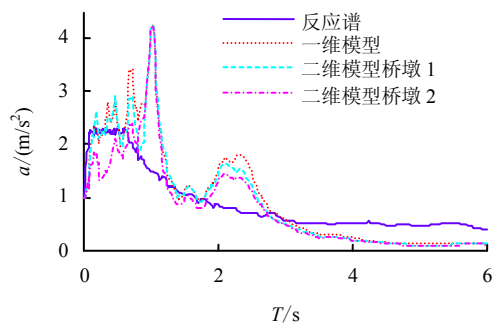


图 19 3 种方法水平地面运动反应谱对比
Fig.19 Response spectra of horizontal acceleration calculated by three methods

由 3 种方法生成的时程可以看出，反应谱生成的时程与通过土层计算生成的时程在波形、峰值上有显著区别，其中反应谱生成的时程峰值为 0.5 m/s^2 ，一维模型计算的地震动峰值为 0.78 m/s^2 ，二维模型的计算峰值见表 2。由于实际的场地并非均匀土层，一维模型和二维模型的计算结果不尽相同，可见通过二维模型计算得到的水平加速度峰值要大于一维模型和通过反应谱生成的时程。同时，方法 2 得到的时程的反应谱的卓越周期要大于规范所规定的反应谱平台段的最大周期，但在周期大于 3 s 的部分又小于规范谱，很难预测这将会对周期较长的结构产生如何影响。通过方法 3 计算得到 2 条时程的反应谱展现了不同的特点，桥墩 1 处的时程反应谱的特点与通过方法 2 得到的时程的反应谱的特点类似，而桥墩 2 处的时程的反应谱在 $T=0\sim 0.68 \text{ s}$ 及 $T>2.80 \text{ s}$ 时小于规范反应谱，在 $T=0.68\sim 2.80 \text{ s}$ 内大于规范反应谱，有与规范反应谱不同的特点。

对比二维场地计算得到的桥墩 1 和桥墩 2 处的时程的 Fourier 谱和反应谱发现，2 个桥墩处的地震动输入在频谱成分有明显的差异，通过一维模型不能考虑这种差异，二维模型计算场地的地震动输入是必要的。

4.3 河谷及河水对地震动输入的影响

河谷以及河谷内河水的存在，使得场地地震动特性发生了显著的变化，随着要考察的点与河谷的距离的增加，河谷和河水对其影响必然会逐渐减弱。因此，有必要研究河谷和河水对场地地震动的影响范围。本文通过 2 个无量纲参数 $\phi_1 = L/H$ 和 $\phi_2 = L/h$ ，研究河谷及河水对地震动输入的影响范围，其中 L 为地震动考察点与河谷岸边的距离； H 为土层厚度； h 为河谷深度。 ϕ_1 ， ϕ_2 分别体现了土层厚度和河谷深度 2 个参数对河谷对周围场地的影响范围的影响。

本节中，将土层的远置边界取为土层厚度的 17 倍，考察被考察点位于 $L/H \leq 12$ 地震动峰值与参数 ϕ_1 和 ϕ_2 的关系。考察点地面峰值加速度与 ϕ_1 和 ϕ_2 的关系，如图 20~23 所示。由图可以看出，在 $\phi_1 \geq 5$ 或 $\phi_2 \geq 140$ 的情况下，河谷对场地的影响可以忽略。通过对比图 20~23 可以看出，同时考虑河水和河谷时场地的影响范围与只考虑河谷时相近，难以判断出河水对周围场地的影响范围。

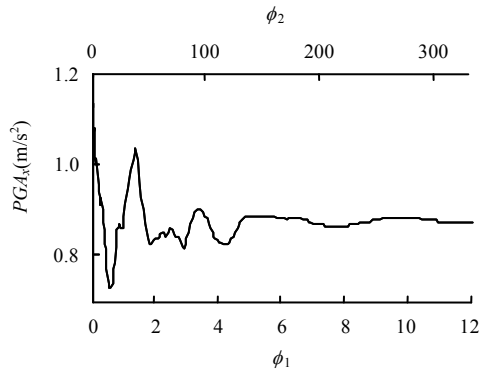


图 20 河谷对水平加速度峰值的影响
Fig.20 Influence of river valley on horizontal acceleration

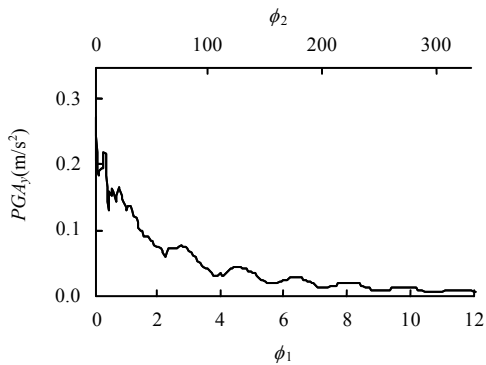


图 21 河谷对竖向加速度峰值的影响
Fig.21 Influence of river valley on vertical acceleration

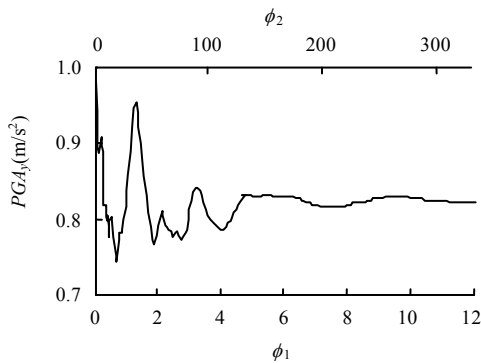


图 22 河水对水平加速度峰值的影响
Fig.22 Influence of water on horizontal acceleration

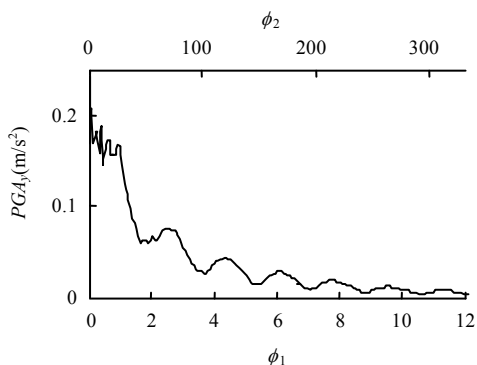


图 23 河水对竖向加速度峰值的影响
Fig.23 Influence of water on vertical acceleration

图 24 为式 (8) 的误差 e 与 ϕ_1 、 ϕ_2 的关系曲线。由图可以看出，当 $L \geq 5H$ 时，河水的影响趋于稳定，并且从整体上看，不考虑河水的存在会高估场地的地震反应。

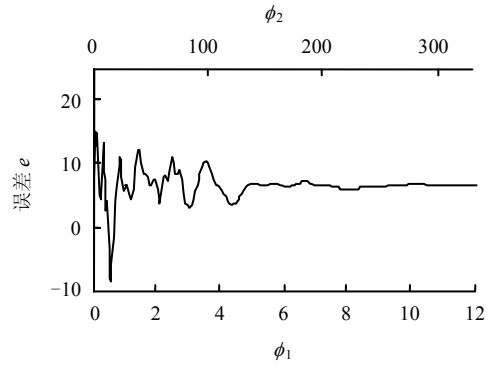


图 24 河水对水平加速度峰值误差的影响
Fig.24 Influence of water on horizontal acceleration error

5 结 论

(1) 用二维模型对复杂条件下的地震反应分析，动水压力对水平向地震反应影响较小，其加速度响应峰值的最大误差为 11.81%，但考虑动水压力可以显著降低土层的竖向地震动，最大误差可达到 177.81%。在此类场地的地震地震安全性评价中，在需要考虑竖向地震动输入时动水压力的作用不可忽视。

(2) 对比 3 种地震动时程方法，规范反应谱反推地震波的方法得到的时程与土层反应计算得到的时程在峰值、波形、频谱成分上有很大的区别。确定此类大跨度结构抗震设计所需的地震动参数时，通过二维场地模型计算能更全面地反映应场地特征对土层地面运动的影响。

(3) 二维模型计算得到的时程的反应谱平台段更长，其卓越周期已超出规范的平台段，此时规范反应谱已难以反映此场地的地震动输入参数的特征。

(4) 河水及河谷对周围场地水平方向的影响范围为沿河谷外侧 5 倍土层深度或 140 倍河谷深度，在此范围内的建筑物的地震动输入均应考虑河谷场地的影响。

参 考 文 献

[1] 中国地震局地球物理研究所，中国地震地质研究所，中国地震局地壳应力研究所，等. GB 17741—2005. 工程场地地震安全性评价标准[S]. 北京：中国标准出版

- 社, 2005.
- [2] 潘旦光, 楼梦麟, 范立础. 多点输入下大跨度结构地震反应分析研究现状[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(10): 1213—1219.
- PAN Dan-guang, LOU Meng-lin, FAN Li-chu. Status of seismic response analysis of long-span structures under multiple support excitations[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2001, 29(10): 1213—1219.
- [3] 楼梦麟, 范么清, 叶爱君. 苏通大桥初设阶段主桥场地地震反应计算[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 429—435.
- LOU Meng-lin, FAN Yao-qing, YE Ai-jun. Computation of site seismic response for Sutong Bridge in preliminary design phase[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2007, 27(4): 429—435.
- [4] 杨笑梅, 杨柏坡. 复杂场地上结构地震反应的研究[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 10—15.
- YANG Xiao-mei, YANG Bo-po. Seismic response of structures on complex sites[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1997, 17(2): 10—15.
- [5] 周国良, 李小军, 侯春林, 等. SV 波入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1161—1166.
- ZHOU Guo-liang, LI Xiao-jun, HOU Chun-lin, Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1161—1166.
- [6] 楼梦麟, 潘旦光, 范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(7): 757—761.
- LOU Meng-lin, PAN Dan-guang, FAN Li-chu. Effect of vertical artificial boundary on seismic response of soil layer[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2003, 31(7): 757—761.
- [7] 张如林. 大型地下结构-土层动力相互作用体系的地震响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [8] LYSMER J, UDAKA T, TSHI C F, et al. A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems[R]. Berkeley: University of California, 1975.
- [9] HARDIN B O, DRNEVICH V P. shear modulus and damping in soils design equations and curves[J]. **Soil Mechanics and Foundations Division**, 1972, 98(7): 667—692.
- [10] 翁大根, 徐植信. 上海地区抗震设计反应谱研究[J]. 同济大学学报, 1993, 21(1): 9—16.
- WENG Da-gen, XU Zhi-xin. A study on seismic design spectrum for shanghai area[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 1993, 21(1): 9—16.
- [11] 潘旦光. 复杂场地的土层地震反应分析[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [12] 住房和城乡建设部标准定额研究所. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.