

复杂地形条件下地震波的传播研究

车伟¹, 罗奇峰²

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 同济大学上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要: 利用显式有限元结合透射人工边界, 研究了典型山谷地形桥址对地震波传播的影响, 探讨了不同入射角度、入射方向及山谷跨度对地震动地形效应的影响规律。结果表明: 坡底各位置的地震动的反应相差不大, 而坡顶及坡顶后一定范围内的地震动存在不同程度的放大; 地震波垂直入射时引起的地表放大效应最大, 山谷左右两侧地表放大效应相对相差不大; 在计算桥梁结构的地震反应时可以仅考虑地震波垂直入射的情况, 其结果是偏安全的; 地形放大效应存在明显的方向性; 山谷的放大作用和山间跨度密切相关。

关键词: 复杂场地; 显式有限元; 人工透射边界; 地震波; 地形效应

中图分类号: TU352

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1333-05

作者简介: 车伟(1979-), 男, 陕西合阳人, 博士研究生, 主要从事大型工程结构抗震与防灾研究。E-mail: chewei721@163.com。

Seismic wave propagation in complex topography

CHE Wei¹, LUO Qi-feng²

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Seismic wave propagation in a typical mountain-valley bridge site was studied based on the explicit finite element method with artificial transmitting boundary. The topographic effects of the incident degrees, the incident directions and the span of the mountain-valley were also discussed. It was shown that the amplification effects at the bottom of slopes did not change obviously. However, the effects near the top of slope were magnified to some extent. The absolute amplification factors were the largest under the condition of normal incidence, and the difference of the relative amplification factors at the left and right sides was not obvious. The normal incidence condition could be considered and the results were safe. Meanwhile, there was obvious directivity of topographic effects. The amplification effects were related to the span of mountain-valley.

Key words: complex site; explicit FEM; artificial transmitting boundary; seismic wave; topographic effect

0 引言

大量震害调查发现, 有些局部场地(地形、地质)对抗震不利, 而有些局部场地则对抗震有利, 如山丘顶部和较厚的软黏土层上的震害较重, 平坦地形坚实土层或岩石上震害较轻。实测记录和理论分析都表明, 震害较重的场地的地震动比平坦场地的要大, 这说明场地条件尤其是地形条件对地震动的影响不容忽视。对建造在复杂场地和地形上的长大桥梁结构而言, 场地和地形条件对桥梁结构的地震响应的影响可能更为显著^[1-4]。

局部场地情况对于地震动的影响一直是地震工程研究的热点。近年来也获得了显著的成果。Hartzell^[5]的研究表明, 在数据收集以及理论分析时需要考虑场地及地形效应。Ashford和Sitar^[6-7]根据坡底自由场地的

的峰值加速度 a_{ff} 、坡顶自由场地的峰值加速度 a_{ffc} 及坡顶峰值加速度 a_{max} 定义了反映场地放大效应的3个参数, 即地形放大 $A_t = (a_{max} - a_{ffc})/a_{ffc}$, 场地放大 $A_s = (a_{ffc} - a_{ff})/a_{ff}$, 地表放大 $A_a = (a_{max} - a_{ff})/a_{ff}$ 。由此得到 $A_a = (1 + A_t) \cdot (1 + A_s) - 1$ 。

这样, 地表放大就可以完全用场地放大和地形放大来描述, 而且也可以从理论上将地形效应与场地效应分开。本文将利用显式有限元和透射人工边界相结合的方法, 重点研究典型山谷地形桥址对地震波传播和散射的影响。以便得出在复杂地形条件下场地地震

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA11Z120); 国家自然科学基金项目(50578125)

收稿日期: 2007-10-15

动的放大系数,其结果可供桥梁选址和抗震设计参考。

1 显式有限元-人工边界方法

1.1 显式有限元的内点计算方法

局部地形对地震动影响问题本质上是波动的散射问题,显式有限元法是一种波动问题的时域数值解法。对地震过程中的每一时刻研究区域内的任一内点建立运动平衡方程:

$$m_i \ddot{U}_{ij}(t) + D_{ij}(t) + F_{ij}(t) = R_{ij}(t), \quad (1)$$

式中, m_i 为 i 点的质量, $\ddot{U}_{ij}$ 为 i 点 j 方向的加速度, $D_{ij}(t)$, $F_{ij}(t)$, $R_{ij}(t)$ 分别为 i 点 j 方向的阻尼力、恢复力和外荷载。

假定阻尼为瑞利阻尼形式:

$$C_i^e = \alpha m_i^e, \quad (2)$$

式中, C_i^e 为 i 节点第 e 个单元贡献的阻尼, m_i^e 为 e 单元对 i 节点的质量贡献, α 为材料阻尼特性系数。

依据有限元法原理, t 时刻作用在 i 节点 j 方向的阻尼力, 只与含有 i 节点的单元阻尼贡献及相应节点速度相关。由于显式有限元使用了集中质量模型, 因此, 很容易求得

$$D_{ij}(t) = \sum_{e=1}^{N_k} \alpha m_i^e \dot{U}_{ij}(t) = C_i \dot{U}_{ij}(t), \quad (3)$$

$$C_i = \sum_{e=1}^{N_k} \alpha m_i^e = \alpha m_i, \quad (4)$$

式中, N_k 为与 i 节点相关的单元数目, C_i 为 i 节点的阻尼系数。

材料阻尼特性系数可由下式近似导出

$$\alpha = 2\xi\omega_0, \quad (5)$$

式中, ξ 为材料阻尼比, ω_0 可取体系的第一自振圆频率或入射地震动的卓越频率。

将式(3)代入式(1)有

$$m_i \ddot{U}_{ij}(t) + C_i \dot{U}_{ij}(t) + F_{ij}(t) = R_{ij}(t). \quad (6)$$

现采用中心差分法对式(6)的加速度、速度进行如下替换:

$$\ddot{U}_{ij}(t) = \frac{1}{\Delta t^2} (U_{ij}^{t+\Delta t} - 2U_{ij}^t + U_{ij}^{t-\Delta t}), \quad (7)$$

$$\dot{U}_{ij}(t) = \frac{1}{2\Delta t} (U_{ij}^{t+\Delta t} - U_{ij}^{t-\Delta t}), \quad (8)$$

将式(7)、(8)代入式(6)后有

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} m_i + \frac{1}{2\Delta t} C_i \right) U_{ij}^{t+\Delta t} = R_{ij}^t - F_{ij}^t + \frac{2}{\Delta t^2} m_i U_{ij}^t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} m_i - \frac{1}{2\Delta t} C_i \right) U_{ij}^{t-\Delta t}. \quad (9)$$

式(9)右端的恢复力 F_{ij}^t 只与 i 节点相关的单元以及相应的节点位移有关, 因此, 只需依据有限单元原

理在单元一级水平上将已知的各单元对 F_{ij} 的贡献进行累加。

式(9)即为显式有限元法内点位移的计算公式, 它是条件稳定的, 有关稳定性条件的研究已有众多的研究成果^[8]。

1.2 时域局部透射边界

作为地基的土层是半无限体, 而桥梁设计最感兴趣的往往集中于局部范围的场地。在应用有限元法分析地震波传播散射问题时, 必须从半无限介质中切取出有限的计算区域, 并在计算区域边界上引入合适的人工边界条件, 以达到消除反射、模拟波动透射过程的目的。

在设置人工边界后, 要实现对原连续介质的精确模拟, 必须保证波在人工边界处的传播特性与在原连续介质中的一致, 使得波通过人工边界时无反射效应, 形成完全透射^[9-10]。因此, 人工边界的精度直接影响对原连续介质模拟的精度。这一类方法有黏性边界、旁轴近似和透射人工边界。黏性边界是一阶精度, 旁轴近似由于与方程性状有关而不通用, 透射边界是可控的高精度人工边界。本文采用二阶透射人工边界, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} U_j^{P+1} &= 2U_{1,j}^{P+1} - U_{2,j}^{P+1}, \\ U_{2,j}^{P+1} &= 0.5(1-S)(2-S)U_{1,j}^P + \\ &\quad S(2-S)U_{1,j-1}^P + 0.5S(S-1)U_{1,j-2}^P, \\ U_{1,j}^{P+1} &= 0.5(1-S)(2-S)U_j^P + \\ &\quad S(2-S)U_{j-1}^P + 0.5S(S-1)U_{j-2}^P. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 $S = \frac{C_a \Delta t}{\Delta x}$, C_a 为人工波速, Δt 为时间步距, Δx 为垂直于人工边界面上离散网格的空间步距。

2 场地影响分析模型及入射波

2.1 场地模型

按照一般工程习惯, 计算二维场地模型, 由于复杂场地的地质构造各不相同, 因此要选择对工程有典型意义的场地, 作为分析的样本, 本文就西部某典型山谷地形桥址进行分析(图1)。

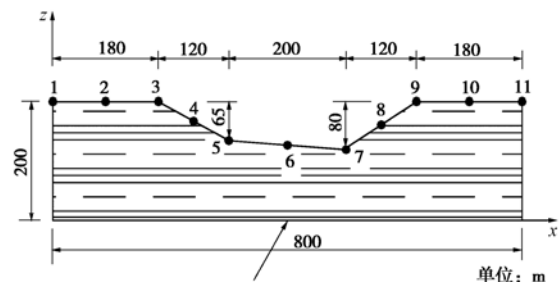


图1 山谷地形场地计算模型

Fig. 1 Mechanical model of mountain-valley site

计算范围取水平方向 800 m, 竖直方向 200 m 的一个矩形区域。场地模型的左右两侧设置人工透射边界, 上边界为自由边界, 下边界设置为弹性边界。基岩上覆盖土层的物理参数见表 1。

表 1 土层的物理参数

Table 1 Physical parameters of layered soil				
土层高度 /m	弹性模量 /(N·m ⁻²)	剪切波速 /(m·s ⁻¹)	密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比
0~20	6.20×10 ⁹	1055.5	1950	0.21
20~40	4.17×10 ⁹	809.0	1700	0.23
40~90	8.40×10 ⁷	468.3	1600	0.20
90~135	7.15×10 ⁷	200.5	1560	0.21
135~200	5.10×10 ⁷	184.3	1500	0.20

2.2 入射波

在近场波动问题中, 地震所带来的破坏很大程度上是由剪切波引起的, 为了充分反映地形对地震动时程的放大作用, 采用 El Centro 波(峰值加速度: 3.417 m/s², t=2.14 s)作为输入地震波, 由底面人工边界向上传入计算区。一般而言, 山谷两岸的地震动, 水平分量比竖向分量受地形条件影响大, 因此, 计算中入射波取为 SV 波^[11], 输入的入射波加速度时程曲线和它的加速度反应谱(阻尼比 5%)如图 2。

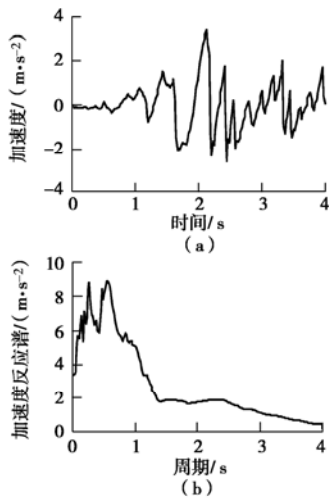


图 2 入射波的加速度时程及加速度反应谱

Fig. 2 Time-history of incident wave and acceleration response spectrum

3 场地表面地震反应分析

3.1 各个观测点加速度反应的比较

表 2 给出了各种情况下观测点的地震动加速度反应峰值, 图 3 为垂直入射时, 各观测点的加速度时程曲线。可以看出: 对同一入射角度, 坡底各点的反应相差不大, 山谷地形和自由场相连接的坡顶附近地震动反应较大, 而且这些观测点的振动持时增长, 尾波振动幅度增大, 这是由于山谷坡顶附近的地震动被放

大的缘故。

表 2 不同入射角度下的峰值加速度

Table 2 Peak values of acceleration under different incident degrees					
节点 编号	单位: m/s ²				
	0°	30°		60°	
	x	x	z	x	z
1	5.92	4.72	2.38	3.80	2.69
2	5.69	4.63	2.26	3.76	2.49
3	5.55	4.37	1.95	3.53	2.23
4	5.22	3.70	1.70	3.03	1.88
5	4.73	3.31	1.43	2.67	1.71
6	4.69	3.33	1.43	2.62	1.67
7	4.77	3.43	1.36	2.64	1.65
8	5.24	3.68	1.56	2.98	1.88
9	5.93	4.57	1.98	3.73	2.26
10	5.57	4.30	1.83	3.51	2.08
11	5.47	4.19	1.75	3.37	1.88

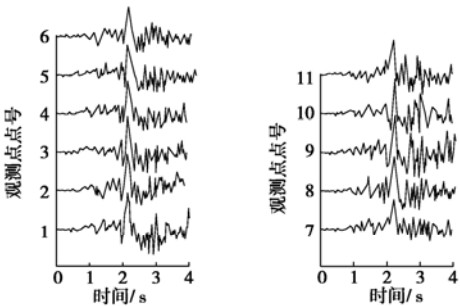


图 3 不同观测点的加速度时程曲线(入射角 $\theta=0^\circ$)

Fig. 3 Time-history curves of surface acceleration ($\theta=0^\circ$)

3.2 山谷场地地形放大效应

(1) 地表地震动的绝对放大系数

图 4 给出了场地地表各观测点地震动绝对放大系数, 即各点最大地震响应和输入地震波峰值之比。

可以看出: 输入地震波的入射角是影响山谷放大效应的重要因素。垂直入射时, 地表地震动绝对放大系数最大, 随着入射角度的增加, 地表地震动绝对放大系数逐步减小。对任何入射角度, 山谷左侧两个方向的最大响应均非出现在坡顶与斜坡的交点(图 1 中的 3 点)处, 而是发生在坡顶的后面(1, 2 点处)。而山谷右侧地表最大响应却出现在坡顶与斜坡的交点处(图 1 中的 9 点), 这说明地形放大效应有方向性, 它与输入地震波的入射角度及两侧斜坡坡度不同有关, 左侧地表地震动最大响应随入射角的增大有向斜坡顶 3 点靠近的趋势(见表 2)。

对地表各点地震动绝对放大系数而言, 水平 x 方向的比值较大, 最大地面加速度达到输入加速度峰值的

2.08倍,说明SV波入射时,会引起相当大的水平方向地震动响应的放大,必须给予足够的重视。而竖直 z 方向的比值较小,且均小于1.0,说明SV波入射时,所引起的地面竖直响应相对较小,这是因为SV波是沿垂直于入射方向振动,在入射角度较小时,其竖向振动分量较小,所以引起的竖直响应也较小。但随着入射角度的增加,其引起的竖直响应有所增加,这从图4(b)中可以看出。

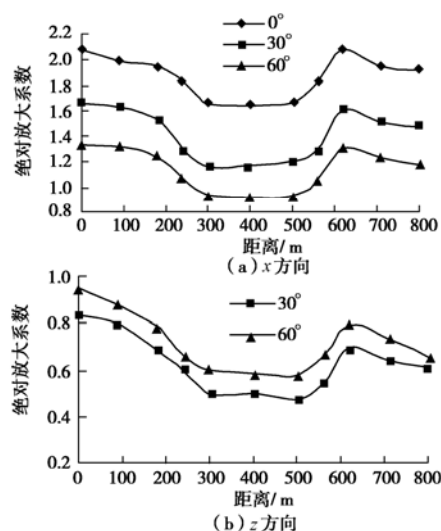


图4 场地地表各点地震动绝对放大系数

Fig. 4 The absolute amplification factors of the mountain-valley topography

(2) 地表地震动相对放大系数

图5给出了场地各观测点的地表地震动相对放大系数,即各点的最大地震响应与坡底响应的峰值之比。

从图5可以看出,对水平 x 方向而言,地表相对放大系数在垂直入射时最小,随着入射角度的增加,地表相对放大系数的值增大;对竖向 z 而言,结论恰好相反。对同一个入射角度,左侧地形的相对放大系数的最大值出现在坡顶后,而右侧地形的相对放大系数的最大值出现在坡顶处,这进一步表明因地形引起的地表放大效应具有明显的方向性。

因地形放大效应产生的放大幅度看,山谷左右两侧的地表相对放大效应相差不大。对于水平方向的响应,虽然地表的相对放大在垂直入射时最小,但地表的绝对放大效应却在垂直入射时为最大,这说明,水平方向响应只要考虑垂直入射的情形。对竖向方向地震动响应,由于地震动响应幅值较小,因而其影响可以不考虑。

3.3 山谷跨度对地表放大效应的影响

考虑山谷跨度对地震反应的影响时,基于以上的分析,只考察地震波垂直入射的情形。图6和图7给出了山谷跨度为200, 400和600 m时地表各观测点 x

方向的加速度的绝对放大效应和相对放大效应的变化规律。

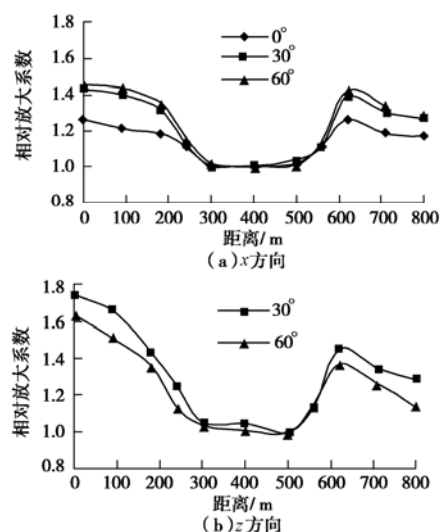


图5 场地地表各点地震动相对放大系数

Fig. 5 The relative amplification factors of the mountain-valley topography

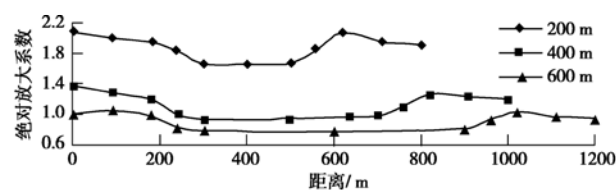


图6 不同跨度 x 方向地表各点地震动绝对放大系数

Fig. 6 The absolute amplification factors under different spans in horizontal direction

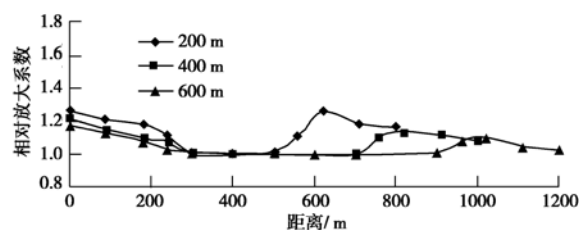


图7 不同跨度 x 方向地表各点地震动相对放大系数

Fig. 7 The relative amplification factors under different spans in horizontal direction

从图6中可以看出,对于地震动绝对放大系数,各观测点在跨度200 m时的比值是跨度600 m时的约两倍,而相对放大系数相差较小(见图7),但都随着山谷跨度的增大,因地形引起的场地地表的放大效应趋于平缓,这主要是由于地震波在山谷中聚集以及相互干涉的能力减弱。同时说明山谷的放大作用和山间跨度密切相关。

4 结 语

本文通过对典型山谷地形桥址效应分析,可得出

以下结论:

(1) 山谷地形坡底对地震动的反应相差不大,在坡顶及坡顶后一定范围内地震动存在不同程度的放大,而各点地震地面运动的差异将对大跨度桥梁的地震反应产生不利影响,在桥梁抗震安全性评估中应予以考虑。

(2) 地震波垂直入射时引起的地表绝对放大系数均为最大。随着入射角度的增加,地表绝对放大系数逐步减小。对同一个入射角度,山谷左侧的地表最大响应出现在坡顶与斜坡交界处的后面,而右侧的最大响应则出现在坡顶与斜坡交界处,说明地表放大效应有方向性,且方向性主要是受输入地震波的入射角度及两侧斜坡坡度不同的影响。

(3) 在SV波垂直入射时,会引起较大的水平方向的绝对放大,需要给予足够的重视。

(4) 山谷左右两侧的地表相对放大效应相差不大。总体上,地形的绝对放大均在垂直入射时为最大,即地形引起的地表最大响应均出现在输入地震波垂直入射时,这说明在地震响应分析中可以只考虑地震波垂直入射的情形,其结果是偏安全的。

(5) 由于地震波随着山谷跨度的增大在山谷中聚集以及相互干涉的能力减弱,场地地表因地形产生的放大效应趋于平缓,说明山谷的放大作用和山间跨度密切相关。

参考文献:

- [1] 罗奇峰, 檀一男. 日本东京城区四个场地的土层放大效应分析[J]. 地震研究, 1996, **19**(4): 418 - 425. (LUO Qi-feng, DAN K. Amplification of the surface layers at four sites in Tokyo, Japan, urban area[J]. Journal of Seismological Research, 1996, **19**(4): 418 - 425. (in Chinese))
- [2] 王君杰, 王前信, 江近仁. 大跨拱桥在空间变化地震动下的响应[J]. 振动工程学报, 1995, **18**(2): 119 - 126. (WANG Jun-jie, WANG Qian-xin, JIANG Jin-ren. Random response of long-span arch bridge under spatially variable seismic excitations[J]. Journal of Vibration Engineering, 1995, **18**(2): 119 - 126. (in Chinese))
- [3] NAZMY Aly S, ABDEL G, AHMED M. Nonlinear earthquake response analysis of long-span cable-stayed bridges: theory[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, **19** (1): 45 - 62.
- [4] 刘洪兵, 范立础. 大跨桥梁考虑地形及多点激励的地震响应分析[J]. 同济大学学报, 2003, **31**(6): 641 - 646. (LIU Hong-bing, FAN Li-chu. Seismic analysis of long span bridges considering topographic effects and multi-supported excitations[J]. Journal of Tongji University, 2003, **31**(6): 641 - 646. (in Chinese))
- [5] HARTZELL S H, CARVER D L, KING K W. Initial investigation of site and topographic effects at Robinwood Bridge, California[J]. Bull Seis Soc Am, 1994, **84**(5): 1336 - 1349.
- [6] ASHFORD S A, SITAR N. Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff[J]. Bull Seis Soc Am, 1997, **87**: 692 - 700.
- [7] ASHFORD S A, SITAR N, LYSMER J, DENG N. Topographic effects on the seismic response of steep [J]. Bull Seis Soc Am, 1997, **87**: 701 - 709.
- [8] 李小军, 廖振鹏, 关慧敏. 粘弹性场地地形对地震动影响分析的显式有限元 - 有限差分方法[J]. 地震学报, 1995, **17**(3): 362 - 369. (LI Xiao-jun, LIAO Zhen-peng, GUAN Hui-min. An explicit finite element-finite difference method for analyzing the effect of visco-elastic Local topography on the earthquake motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, **17**(3): 362 - 369. (in Chinese))
- [9] YANG Jun, SATO T. Interpretation of seismic vertical amplification observed at an array site[J]. Bull Seis Soc Am, 2000, **90** (2): 275 - 285.
- [10] CELEBI M. Topographic and geological amplification determined from strong-motion and after shock records of the 3 March 1985 Chile Earthquake[J]. Bull Seis Soc Am, 1987, **77**: 1147 - 1167.
- [11] 廖振鹏. 工程波动导论[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2002. (LIAO Zhen-peng. Engineering wave theory[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))