

使用地面单台三分向地震记录资料 评估场地效应方法的研究

马淑芹, 龚绍京, 栗连弟, 戚成柱

(天津市地震局, 天津 300201)

摘要: 利用唐山强震观测台阵提供的井下和地面数字测震资料, 研究了用单台地震记录评估场地效应的方法. 利用井下基岩地震记录作参考台, 用地面和井下的记录求取经验传递函数. 同时应用 Nakamura 单台评估方法求解 Nakamura 谱比率. 通过对比, 证实了对场地效应的评估可以使用地面单台测震资料进行, 不必参考基岩台的数据. 因此, 该方法是评估重要工程场地效应的一种简便可行的方法. 使用该方法可以降低地震小区划的成本.

关键词: 场地效应; 评估方法; 经验传递函数; Nakamura 谱比率

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2001)03-0269-05

0 引言

地震是危及人民生命财产安全的严重自然灾害. 为了减轻这种灾害, 必须大力进行地震预报与地震工程二方面的探索和研究工作. 研究软土地基在地震时对建筑物的破坏作用, 是工程地震的一个重要研究领域. 无论是地震烈度的微区划还是进行场地效应评估, 都要求研究重要工程所在地的“场地效应”. 1976年唐山 $M_S 7.8$ 地震时, 由于软土地基的影响, 天津市震害加重, 是地震烈度 VII度区内的 VIII度高烈度异常区. 软土地基场地效应造成的震害在中国是最严重的, 在世界上是少见的. 1999年台湾南投 $M_S 7.3$ 地震使台北市 300 多栋建筑物遭到破坏, 而台北市距离该次地震震中 150 km, 并不在极震区内. 其震害这么严重也与软土地基有明显的关系. 在全球范围内, 在软土地基上形成严重震害的震例还有 1964 年日本新泻 $M_S 7.1$ 地震和 1985 年墨西哥 $M_S 8.1$ 地震等. 因此, 在软土地基上进行工程建设时必须先对其场地效应进行评估.

自 1970 年以来, 一些学者先后对场地效应的评估方法进行了研究, 证明用软土地基台站和基岩台的记录资料计算的转换函数或谱比率(为了区别于单台方法, 将它称为经验传递函数), 可用来评估场地效应. 这种方法要求要有一个台阵, 其中必须有一个位于基岩上, 同时远离场地效应源的台站作为参考台. 这个台站离台阵内的其它台也不能太远, 一般在几公里范围内. 台阵内的所有台必须同时记录到数个地震. 但是实际情况往往是参考台站能记录到的事件, 软土地基上的台站难以记到. 所以须要工作较长的一段时间. 目前中国的固定地震台网的

观测记录难以符合这一要求. 虽然布设临时流动台网可以弥补这一不足, 但若用流动台网去研究各地的场地效应, 显然是很费人力物力的.

1989 年, 日本 Yutaka Nakamura 博士根据深井微震实验研究, 证明井下基岩处 S 波水平分量及垂直分量的振幅谱之比近似等于 1, 即 $\frac{H_B}{V_B} \approx 1$ (H_B 和 V_B 分别为井下基岩处地震 S 波水平分量及垂直分量的振幅谱), 进而提出一种不用基岩参考台, 仅使用单台地震记录评估场地效应的方法^[1]. 1993 年墨西哥 Javier Lermo 利用流动地震台阵在墨西哥的 3 个城市进行了单台方法与经验传递函数方法的对比实验研究. 结果表明, 如果场地效应的地质条件较简单即软土层为平面分层, 沿水平向是均匀各向同性的, 只在垂直方向上分层(经验传递函数同样需要这种假设), 利用单台记录评估场地效应是可行的^[2]. 如果单台方法被证明行之有效, 那么就可充分利用目前已经获得的地面地震记录资料来评估场地效应.

中国平原地区分布有许多大城市, 如天津市、上海市等, 单台方法对于这些城市建筑的场地效应评估是极为有用的. 本文应用中国地震局工程力学研究所建立的唐山强震观测台阵的资料, 求取了经验传递函数及 Nakamura 谱比率. 通过对比, 研究了用单台测震资料评估软土地基场地效应的可行性.

1 唐山响堂三维场地观测台阵概况

中国地震局工程力学研究所建立的唐山响堂三维场地观测台阵是宽频带、大动态的. 共有 4 个测点, 5 台地震仪. 布设情况是: 基岩地表 2 台, 速度仪、加速度仪各一台, 称为测点 1; 土层地表 1 台, 为加速度仪, 称为测点 2; 地下 17 m 处基岩上 1 台, 为加速度仪, 称为测点 4; 地下 32 m 处基岩上 1 台, 为加速度仪, 称为测点 3. 另外还安装了分辨率为 16 位的井下数字观测系统, 测点 2 和测点 3 是主机, 测点 4 是从机, 主机和从机同步运行, 系统时钟采用 Omega 导航信号自动校对(精度为 1 ms). 地震计为力平衡式、三分向的, 频率响应范围是 0~50 Hz, 动态范围是 90 dB, 采样时间间隔是 0.005 s, 满量程是 ± 2 g. 该台阵自投入运行至 1997 年 12 月已取得了 60 个同一地点、不同深度处的地震加速度记录 ($M_L 1.5 \sim 5.9$), 最大地表峰值加速度为 60.11 cm/s^2 . 这些记录震相完整, 波形清楚, 计时精确, 震中距小, 为进行场地效应研究提供了宝贵的观测数据^[3].

本文的研究只使用该台阵测点 2 和测点 3 的三分向数字地震记录资料. 这 2 个测点位于观测室内, 其设备为美国 KINEMATRICS 公司的产品^[3].

2 研究方法和过程

2.1 经验传递函数 S 的简化表示法

设 V_S 为在地表处地震动垂直分量的 S 波振幅谱, V_B 为在基底处地震动垂直分量的 S 波振幅谱, H_S 为在地表处水平分量的 S 波振幅谱, H_B 为在基底处水平分量的 S 波振幅谱.

经验传递函数 S 为:

$$S = \frac{H_S}{H_B}$$

Nakamura 谱比率为:

$$S_N = \frac{H_S}{V_S}$$

本文的任务是: (1) 用井下基岩处的 S 波记录证实 $\frac{H_B}{V_B} \approx 1$; (2) 用地表土层和井下基岩处

的 S 波记录证实 $\frac{V_S}{V_B} \ll \frac{H_S}{H_B}, \frac{V_S}{V_B} \approx 1$, 即井下基岩处地震动的水平分量和垂直分量大致相等, 垂直分量经过软土层之后的放大效应远远小于水平分量的放大效应, 基本没有被放大, 因此 $H_B \approx V_B \approx V_S$. 在此基础上, 经验传递函数可以简化为 Nakamura 谱比率, 即 $S \approx S_N$.

因此, $\frac{H_B}{V_B} \approx 1$ 和 $\frac{V_S}{V_B} \approx 1$ 是单台评估技术的基础.

2.2 数据处理

使用测点 2 和测点 3 记录的 1994 年 10 月 4 日河北滦县 $M_L 3.3$ 地震、1995 年 6 月 23 日河北古冶 $M_L 3.5$ 地震和 1996 年 3 月 24 日河北滦县 $M_L 3.0$ 地震的数字波形进行研究. 选取 S 波峰值前后 10 s 的数据, 共 2 048 个, 滤除直流分量, 进行 FFT 变换, 求取振幅谱. 对于振幅谱, 利用 Hanning 窗进行平滑处理^[4]. 应用平滑后的谱求取谱比率. 井下基岩处水平分量与垂直分量的谱比率计算结果见图 1. 3 个分量的经验传递函数见图 2.

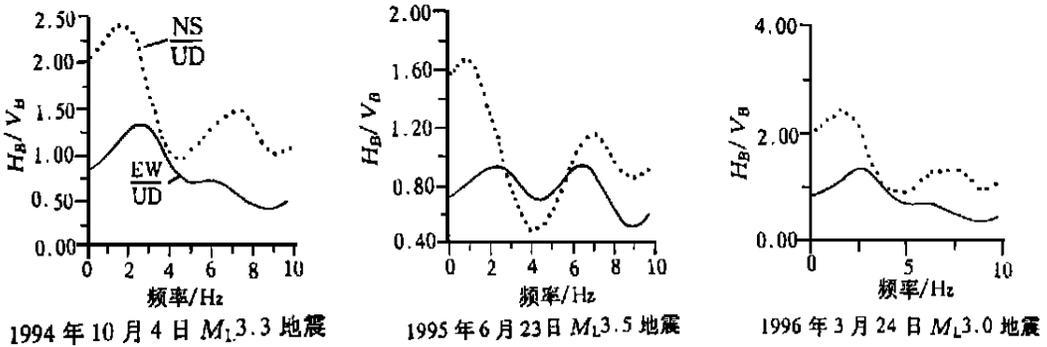


图 1 唐山响堂井下基岩处的谱比率 $\frac{H_B}{V_B}$

Fig. 1 Spectral ratio $\frac{H_B}{V_B}$ on borehole rock in Xiangtang, Tangshan city.

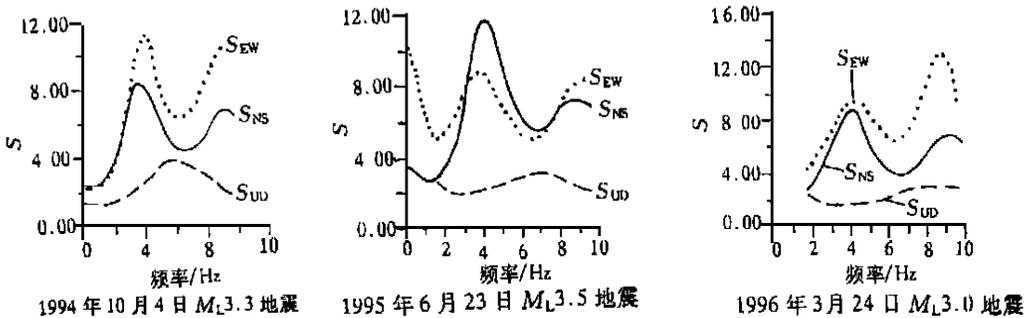


图 2 在响堂 S 波三分量经过软土覆盖层的放大情况

Fig. 2 Amplifications of three components of S wave by soft soil layer in Xiangtang.

由图 1 可见, 对于每次地震, 2 条曲线的数值都在 1 附近. Lermo Javier 认为, 数值在 2 以下都可视为接近 1^[2]. 本文结果的最大值略大于 2. 本文选用的地震震级较小, 震中距范围也不大. Lermo Javier 研究了墨西哥地区震中距为 0~400 km 的基岩上的 $M_L = 2.9 \sim 8.1$ 地震的

不同方向地震波的谱比率^[2], 所得结果与本文相同. 因此, 不管震中距与震级多大, 在基岩处,

$\frac{H_B}{V_B} \approx 1, H_B \approx V_B$ 总是成立的. 由图2及 Lermo Javier 的研究^[2]可见, 对于每次地震, 总有: S_{UD}

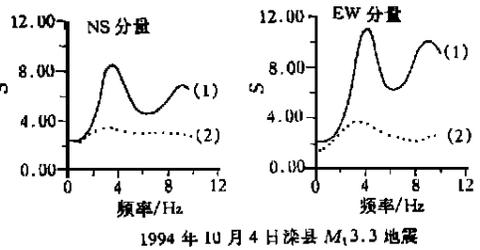
$\approx 1, S_{UD} \ll S_{NS}, S_{UD} \ll S_{EW}$, 即 $\frac{V_S}{V_B} \approx 1, \frac{V_S}{V_B} \ll \frac{H_S}{H_B}$ 成立.

由图 1 和图 2 可知, $H_B \approx V_B \approx V_S$. 因此, 研究场地效应时, 地下基岩界面处地震动的水平分量可以用软土地面地震动的垂直分量近似代替, 方法是用 Nakamura 谱比率代替经验传递函数. 由此, 评估场地效应可以不用参考台, 仅根据地表软土层台站的记录即可直接进行.

2.3 经验传递函数与 Nakamura 谱比率的比较

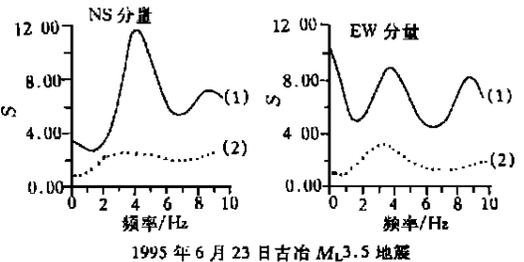
响堂强震观测台阵是目前中国唯一的在软土地面、井下基岩上同时观测地震波的系统. 基于这样的观测基础, 在该处, 以井下基岩处的地震台为参考台, 直接求取经验传递函数. 所求出的经验传递函数和 Nakamura 谱比率见图 3.

由图 3 可见, 3 次地震 NS 分量的 Nakamura 谱比率与其经验传递函数的卓越频率和峰值相近, 曲线形状也接近. EW 分量也是如此, 只是 Nakamura 谱比率的幅值比经验传递函数的要小一点. 这是由于 V_S 比 V_B 和 H_B 稍大一些. 由此可见, 作为一级近似, Nakamura 谱比率可以取代经验传递函数, 而用于评估场地效应.

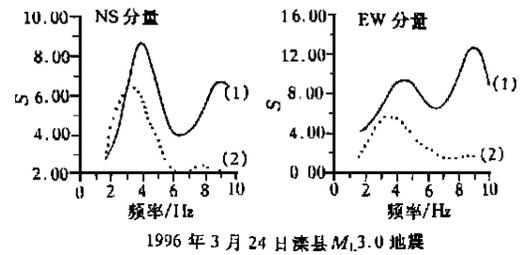


3 结论

本文使用唐山响堂强震观测台阵记录到的数字地震波资料, 在频率域内进行研究. 结果表明: 位于基岩上的台站记录的地震波的 3 个分量的振幅大致相等, 即 $\frac{H_B}{V_B} \approx 1$. 在基岩上面覆盖的沉积层沿水平向是均匀各向同性的, 只在垂直方向分层的情况下, 地震波的垂直分量经过沉积层后基本上放大得不多, 而水平分量放大很明显, 即 $\frac{V_S}{V_B} \ll \frac{H_S}{H_B}$. 因此经验传递函数可以用 Nakamura 谱比率代替. 如果处理的资料较多, 可以在经验传递函数 S 与 Nakamura 谱比率 S_N 之间求出一个系数, 此系数是频率的函数. 这样, 场地效应评估可以使用地面单台三分量测震资料进行, 不必参考基岩台, 从而降低了地震小区划的成本. 这对于地表为大面积松散沉积层, 无基岩出露的地区, 如上海市和天津市的场地效应评估是极为有利的.



盖的沉积层沿水平向是均匀各向同性的, 只在垂直方向分层的情况下, 地震波的垂直分量经过沉积层后基本上放大得不多, 而水平分量放大很明显, 即 $\frac{V_S}{V_B} \ll \frac{H_S}{H_B}$. 因此经验传递函数可以用 Nakamura 谱比率代替. 如果处理的资料较多, 可以在经验传递函数 S 与 Nakamura 谱比率 S_N 之间求出一个系数, 此系数是频率的函数. 这样, 场地效应评估可以使用地面单台三分量测震资料进行, 不必参考基岩台, 从而降低了地震小区划的成本. 这对于地表为大面积松散沉积层, 无基岩出露的地区, 如上海市和天津市的场地效应评估是极为有利的.



(1) 经验传递函数; (2) Nakamura 谱比率

图 3 经验传递函数与 Nakamura 谱比率的对比

Fig. 3 Comparison between empirical transfer function and Nakamura spectral ratio.

本文使用的唐山响堂强震观测台阵的数字地震波资料由北京强震观测中心周雍民研究员提供, 特此致谢.

[参考文献]

- [1] Nakamura Yutaka. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface [J]. *QR of RTRI*, 1989, 30(1): 25—33.
- [2] Javier Lemo. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station [J]. *BSSA*, 1993, 83(5): 1574—1594.
- [3] 谢礼立. 唐山响堂三维场地影响观测台阵 [J]. *地震工程与工程振动*, 1999, 19(2): 1—8.
- [4] Beresnev I A. Magnitude of nonlinear sediment response in Los Angeles basin during the 1994 Northridge, California earthquake [J]. *BSSA*, 1998, 88(4): 1079—1084.

STUDY ON METHOD EVALUATING SITE EFFECT USING THREE-COMPONENT SEISMOGRAMS OF SINGLE STATION ON SURFACE

MA Shu-qin, GONG Shao-jing, LI Lian-di, QI Cheng-zhu
(*Seismological Bureau of Tianjin City, Tianjin 300201, China*)

Abstract: Single station site effect evaluation method is studied using seismograms obtained by strong motion observation array in Tangshan. Using rock station in borehole as reference station, empirical transfer function is calculated with seismograms of both surface and borehole. Simultaneously, the Nakamura spectral ratio is calculated with surface seismograms. The results by the two ways are compared and it is confirmed that the single station method is encouraging. The method can be applied in site effect evaluation for important buildings as a simple, executable method.

Key words: Site effect; Evaluation method; Empirical transfer function; Nakamura spectral ratio