

软土覆盖层地震面波的地震动反应及台湾8级地震对上海高层建筑影响的估计

徐永林

(上海市地震局,上海 200063)

摘要:用2002年3月31日台湾 $M_s7.5$ 地震时上海地区软土地表和基岩记录的加速度资料讨论了地表软土覆盖层面波的地震动反应,并用经验格林函数法合成了台湾未来8级大地震在上海基岩和土层处的面波加速度时程,初步估计了其对于高层建筑的影响。其结果对上海的工程抗震设计有参考价值。

关键词:上海;地震面波;地震动反应;经验格林函数;抗震设计

中图分类号:P315.9 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2004)04-0309-06

0 引言

上海及周边地区有着近400 m厚的软土覆盖层。众所周知,地表软土覆盖层对地震波有放大作用。1985年9月19日墨西哥 $M_s8.1$ 地震和1995年1月17日日本阪神 $M_s7.4$ 地震都由于有软土覆盖层而使人员和经济损失更加巨大。

从上海地区实际观测到的记录资料看软土覆盖层的放大作用也非常明显。2002年3月31日台湾以东海中(24.4°N , 122.1°E)发生 $M_s7.5$ 地震,上海软土地表的地震面波最大加速度在三个方向上都比基岩处的地震面波的最大加速度大很多。

高层建筑对地震动的响应也会加大大楼的实际地震动量。在上述台湾地震中,软土地表自由场中面波最大加速度各分向不到 1 cm/s^2 ,而上海民防大厦(高32层)第23层水平两个分向的相应最大加速度分别达 5.253 cm/s^2 和 3.566 cm/s^2 。因此,若台湾发生8级大震,上海的高层建筑将会产生很大的地震动响应,可能会引起人们的恐慌,造成不必要的人员伤亡。

本文用经验格林函数方法合成上海基岩处的台湾8级地震的地震面波时程,然后通过软土覆盖层地震面波的传递函数获得软土地表的地震动,通过类比法粗略地估计最普遍性的30层左右高层建筑地震动的大小。目的是:一方面为政府部门提供定量的、较可靠的台湾8级地震对上海可能影响程度的评估数据;另一方面试图给出上海地区6 s以上地震波可能对建筑物,特别是超长固有周期建筑物影响的地震动时程,作为现行地震安全性评价的一个补充。

1 软土覆盖层对地震面波的放大作用

1.1 从时域看软土覆盖层的放大作用

2002年3月31日台湾以东海中(24.4°N , 122.1°E)发生 $M_s7.5$ 地震,上海基岩和软土地表都记录到了该次地震的直达波和面波。所用仪器是美国Kinematics公司生产的宽频带数字化加速度仪,其频带为0~50 Hz,采样分辨率为19 bit,采样率为每秒每分向200点。记录地震加速度时程清晰。

图1是基岩和地表软土处的地震面波的记录。看出,软土地表面波的加速度比基岩表面的大许多,垂直向相对要小一些。表1分别列出了它们最大加速度值。

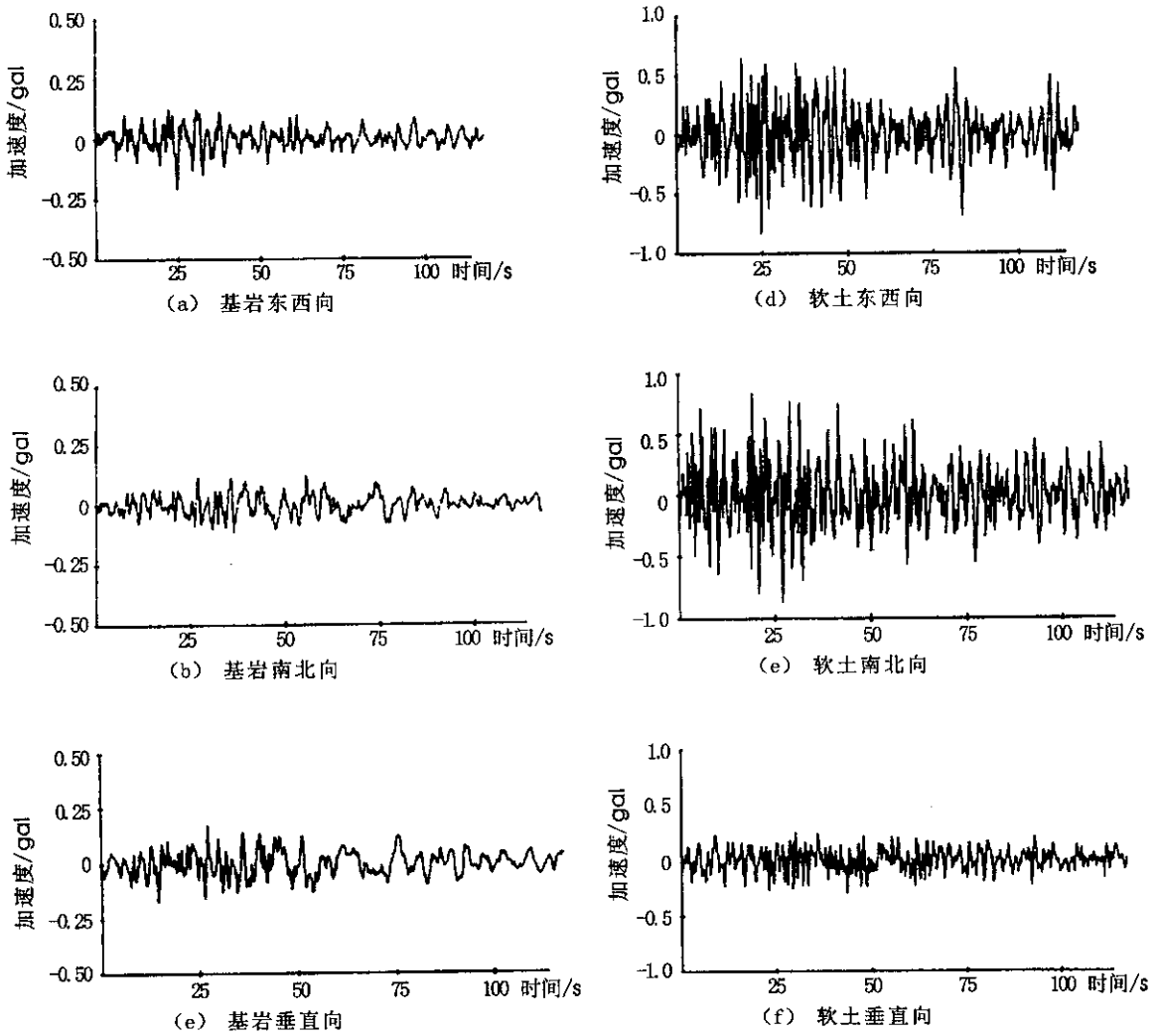


图1 台湾 $M_s 7.5$ 地震在上海基岩和地表软土处记录的面波加速度时程

Fig. 1 The recorded acceleration surface wave of Taiwan $M_s 7.5$ earthquake on March 31 2002 on both rock and soft soil in Shanghai.

1.2 从频域看软土覆盖层的放大作用

各个频率的地震面波在软土地表处的幅值比基岩处的幅值放大多少,即软土覆盖层的地震面波传递函数模的大小,直接关系到软土地表地震动时程的形态变化和结构抗震紧密相关。

图2是软土覆盖层地震面波传递函数的模图。可以看出 $0 \sim 4$ Hz 明显有一个低频平台,显然大部分对应的是地震面波的成分,其平均放大倍数对水平两分向约4~6倍。另一值得注意的现象是传递函数模的最大值在4~6 Hz左右,与近震SH波类似^[5],耐人寻味,因为近震SH波与台湾地震的面波不论从地震波的频率成分还是从波的形态、传播途径等上都大相径庭。这个问题值得研究。

2 软土覆盖层中地震面波频谱分析

表1 台湾 $M_s 7.5$ 地震在上海基岩和软土地表的面波加速度最大值

	EW向/ [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$]	NS向/ [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$]	垂直向/ [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$]
基岩处	0.212	0.125	0.176
软土地表处	0.835	0.871	0.287

图3是台湾2002年3月31日 $M_s 7.5$ 地震面波在上海基岩地表和软土地表记录的 Fourier 谱。从图

中可以看出 软土地表地震面波主频相对基岩地表的有明显的向高频方向飘移。由于软土地表记录的高质量的地震面波资料较少,所以如此结果较少见,也显得尤其珍贵。这一飘移对高层建筑的影响不可低估,因为这样地震面波的优势频率更靠近大多数高层建筑的固有频率,对高层建筑的抗震设计不利。

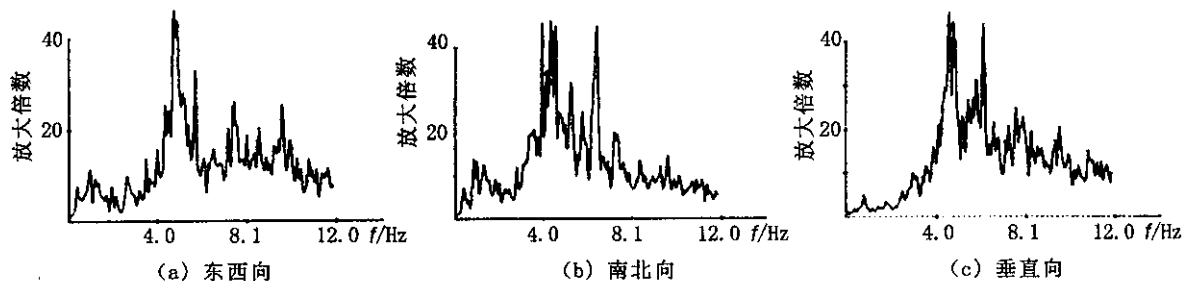


图2 台湾 $M_s 7.5$ 地震在软土覆盖层地震波的传递函数模图

Fig.2 The magnitude transfer function of surface wave from Taiwan $M_s 7.5$ earthquake at soft soil surface in Shanghai.

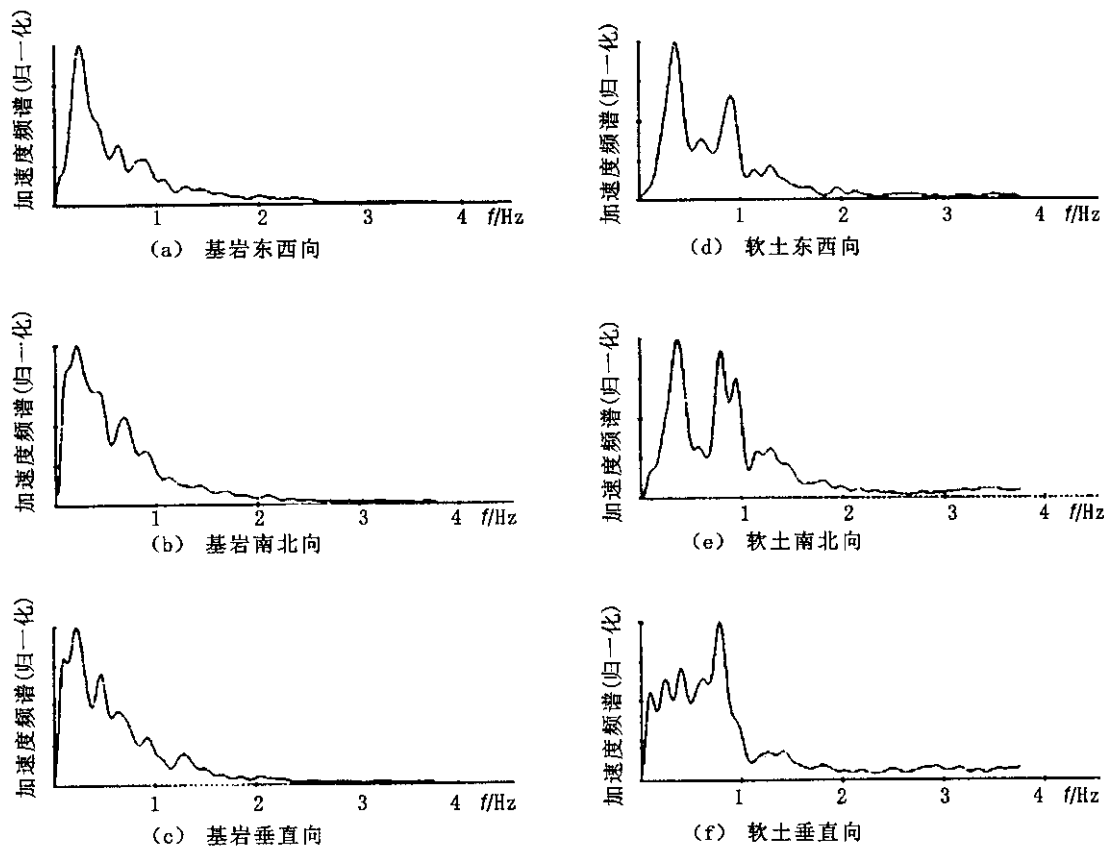


图3 台湾 $M_s 7.5$ 地震面波基岩地表和软土地表的 Fourier 谱对比图(已归一化)

Fig.3 The comparison of Fourier spectrum between rock surface and soft soil surface for Taiwan $M_s 7.5$ earthquake(Normalized).

另一现象是在基岩处地震面波的优势频率主要以单峰出现,但在软土地表处地震面波的优势频率则主要以双峰出现。这一现象一定与软土覆盖层的厚度及介质特性等有关。软土层相当于一个动力系统,它本身有其固有频率。地脉动测量的资料表明,上海软土层地脉动振动有几个固有频率。用短周期摆测量的资料较多,得到 0.9 Hz 左右是一个主固有频率;用宽频带仪器测量,也有几秒周期的固有频率(实测资料点少,不给出具体值)。显然当外界作用力作用时,土层主固有频率附近的地震波有较大的放大率。

这可能是上述现象的主要原因。

3 台湾未来 8 级地震对上海高层建筑影响的估计

台湾虽距上海 1 000 km 左右,但那儿发生的较大地震使居住在上海高层建筑的人们明显有感。以民防大厦为例,该大厦共有 32 层,高约 100 m,一阶主频为 2.2 s。2002 年 3 月 31 日台湾 $M_s 7.5$ 地震时该大厦第 23 层记录的地震最大加速度水平向分别为 5.253 cm/s^2 和 3.566 cm/s^2 。当时大厦内帘灯晃动幅度很大,许多人出现惊慌状。2002 年 5 月 15 日台湾又发生了 $M_s 6.5$ 地震,该大厦内也普遍有感(许多别的高层建筑也普遍有感),该大厦第 23 层记录的地震最大加速度水平向分别为 1.384 cm/s^2 和 1.251 cm/s^2 ,第 32 层则为 2.415 cm/s^2 和 1.771 cm/s^2 。由此推断若台湾发生 8 级地震,对上海高层建筑的影响肯定不小,需要有个正确的预测和定量的估计,以便政府部门做好各种应对措施,避免不必要的人员和经济损失。

由于软土覆盖层的地震面波传递函数已初步获得,且台湾以前若干地震上海基岩有较好记录,因此已具备定量估计的条件。

3.1 经验格林函数方法

Hertzell^[6]、Irikura^[7]等人提出用小震记录的叠加合成较大的地震,被称为经验格林函数法。由于大地震和同一地点发生的小地震的传播路径相同,把小一些的地震记录作为经验格林函数,可以不对传播路径上那些介质参数作种种假设。如果小地震的震源机制与大地震类似,该方法可以用小地震相当成功地合成大地震。

设大地震断层破裂为矩形破裂,长为 L ,宽为 W ,上升时间为 τ ,把大地震断层面分为 $n \times n$ 个小区,各个小区的位错为 $D_{ij}(t)$, $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。根据大地震与小地震断层参数之间的相似性法则,它们的地震矩 M_0 和 M_{0e} 之间存在关系 $n = [M_0/M_{0e}]^{1/3}$,而

$$D_{ij}(t) = \sum_{k=1}^n D_{0e}[t - (k-1)\tau/n] \quad (1)$$

选择破裂方式、震中距等与大地震相近,并与大地震有相同记录地点的小地震记录作为近似格林函数,根据 Aki 和 Richards 在《定量地震学》(第 1 卷)中的公式(3.2),即在没有体力的情况下,大地震与小地震位移之间的关系可简化为

$$u_n(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{r_c}{r_{ij}} u_{ne}[t - t_{ij} - (k-1)\tau/n] \quad (2)$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v} + \frac{r_{ij}}{v_c} \quad (3)$$

其中: v 为断层破裂速度; v_c 为地震波传播速度(面波或体波); r_{ij} 为地震子源至观测点之间的距离; r_c 为小地震至观测点之间的距离; d_{ij} 为破裂初始点至第(i, j)个子断层的距离; $u_n(t)$ 为合成大地震之位移; $u_{ne}(t)$ 为作为格林函数的小地震的位移; τ 为震源时间函数上升时间。

原则上利用上面所假设的条件,只要确定了断层走向、断层倾角、断层的长和宽、上升时间、地震矩、破裂速度、破裂方式等参数,用小地震的地震动时程可计算出大地震的地震动时程。

3.2 合成台湾 8 级地震在上海基岩处的面波加速度时程

用经验格林函数法合成台湾地震在上海基岩处的地震动时程,庄昆元、徐永林等曾做过相当成功的工作(软土覆盖层地震动反应没有做工作),当时用的 CDSN 中长周期速度型的数字地震资料^[2]。

本文用台湾 $M_s 7.5$ 地震的加速度资料作为经验格林函数的数值直接合成未来该震区 $M_s 8$ 大震在上海基岩处的加速度时程。设主震参数如下:断层走向 $N90^\circ E$;断层倾角 77° ;断层长度 65 km;断层宽度 32 km;上升时间 7 s;破裂速度 2.5 km/s 。

$M_s 8$ 地震的地震矩可由地震震级与地震矩的经验关系估算($\log M_0 = 1.5M_s + 16.05$),而上述所选作为经验格林函数的地震矩参照美国哈佛大学震源机制解所得结果。经合成计算,得到佘山基岩台湾 8 级

地震面波时程(图4)。

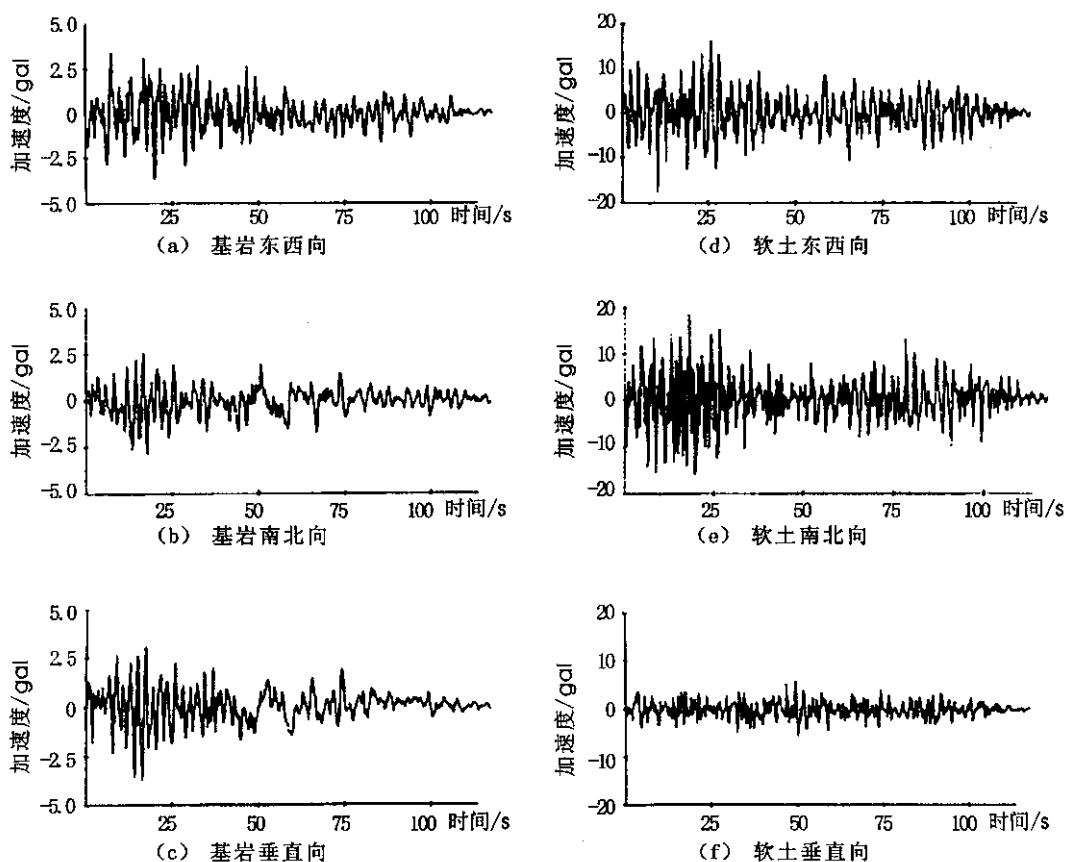


图4 台湾8级大震在上海基岩和软土地表地震面波的加速度时程

Fig. 4 The acceleration surface wave from Taiwan M_s 8 earthquake on both rock and soft soil in Shanghai.

3.3 台湾8级大震在上海软土地表处的面波加速度时程

有了基岩处的面波加速度时程,前面已经得到了上海软土覆盖层的地震面波的地震动传递函数,在时域可用 $h(t)$ 表示。软土地表相应的8级大震的面波加速度时程可由基岩地表面波加速度和传递函数 $h(t)$ 的褶积表示:

$$A(t)_{\text{地表}} = A(t)_{\text{基岩}} \cdot h(t) \quad (4)$$

这里未考虑土层的非线性,而是作简单的线性估计。土层的非线性问题本身是一个很复杂的问题,有的学者认为土层的非线性因素很重要,而有的学者认为土层的地震波放大因子与地震波振幅的大小关系不大^[1]。

计算结果见图4。可以看出,台湾8级大震在上海软土地表面波的最大加速度值EW和NS向分别达 17.811 cm/s^2 和 18.780 cm/s^2 ,已经超出了人们的想象。

3.4 台湾8级地震对上海高层建筑的影响的初步估计

本文所谓的台湾8级地震对上海高层建筑的影响的初步估计不是通过严格的结构振动传递进行计算或结构动力学演算的,而是仅对具有和上海民防大厦类似的固有周期、高度和一般特性的普通高层建筑进行简单类比。

经过简单的线性估计,台湾8级地震在类似民防大厦这样的建筑20层以上的层面,水平向加速度地震动不小于 70 cm/s^2 。这个加速度值有一定的大小,且面波具有较长的持时,故对大厦内的居民会产生较

强的恐慌心里,重心较高的物体有可能出现倾覆现象。

4 结论与讨论

本文主要讨论了长周期地震面波的软土覆盖层地震动反应。一方面,软土覆盖层对长周期地震面波加速度幅值有较大的放大性;另一方面,它使长周期地震面波经过土层后,其频谱与基岩处相应的频谱变化了许多。

本文还用经验格林函数方法合成了台湾8级大震在上海基岩处的地震面波的加速度地震动,并通过土层地震面波传递函数获得了软土地表的地震面波的加速度地震动;另外通过类比方法粗略估计了30层左右高的大厦可能受这样地震的影响程度,可作为政府有关抗震防灾部门的决策参考依据。

我国现行的建筑抗震设计规范给出的地震影响系数曲线,其长周期部分不超过6s。地震小区划及重大工程的安全性评价工作中目前广泛采用概率方法,其衰减规律的长周期部分由于缺乏资料也具有很大的不确定性。本文用经验格林函数法合成台湾大地震的面波加速度地震动,地震动的能量主要集中在低频长周期部分。因此,此合成的资料对现行地震安全性评价工作是一个补充,对长固有周期构筑物受长周期地震波影响研究提供了软土自由场表面加速度地震动时程定量可靠的资料。

但本文一些结果是初步的,有些复杂的层面没有深入研究,如土层的非线性问题等。另外,软土层上记录高质量的面波资料较少,文中所得结果可能有所偏差,这也是文章欠缺之处。

[参考文献]

- [1] 安艺敬一. 地震强震动的予測—安艺敬一教授讲演速记[J]. 国立防灾科学技术センター研究速报. 1989, 80 : 1 - 130.
- [2] 庄昆元, 徐永林, 沈建文, 等. 台湾长周期波对上海的影响研究[J]. 地震学报. 1997, 19(6) : 634 - 639.
- [3] 石玉成, 蔡红卫, 孙崇绍. 黄土地区场地的地震地面运动参数特征[J]. 西北地震学报, 1998, 20(3) : 66 - 72.
- [4] 何开明, 孟广魁, 班铁. 用地脉动研究银川沉积地层的地震波放大特性[J]. 西北地震学报, 1999, 21(4) : 383 - 388.
- [5] 徐永林, 熊里军, 章纯, 等. 用强震仪记录资料研究上海地表土层的地震动放大反应[J]. 地震学报, 2002, 24(6) : 662 - 666.
- [6] Hartzell S H. Earthquake aftershocks as Green 's function[J]. Geophys. Res. Lett., 1978, 5 : 1 - 4.
- [7] Irikura K. Semi - empirical estimation of strong ground motions during large Earthquake[J]. Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto University, 1983, 33(298) : 63 - 104.

AMPLIFICATION RESPONSE OF GROUND MOTION ON SOIL AND INFLUENCE ESTIMATION OF TAIWAN M_s 8 EARTHQUAKE TO SHANGHAI HIGH-BUILDINGS

XU Yong-lin

(*Seismological Bureau of Shanghai City, Shanghai 200062, China*)

Abstract : Using the data of seismic acceleration on both soil surface and rock recorded in Shanghai area in Taiwan M_s 7.5 earthquake on March 31, 2002, the amplification response of ground motion for S wave on soil coverage is discussed. The acceleration time - history curves of S wave on the rock and soil coverage of Shanghai city in possible future M_s 8 earthquakes are composed with empirical Green-function, and its influence on high buildings is estimated preliminarily. The result could be useful to aseismic designing of high building in Shanghai.

Key words : Shanghai ; Seismic surface wave ; Ground motion response ; Empirical Green-function ; Aseismic design