

齐玉妍, 孙丽娜, 张合, 彭远黔, 2016. 唐山地区强震动记录的应用研究初探. 震灾防御技术, 11 (2): 342—348.  
doi: 10.11899/zzfy20160217

# 唐山地区强震动记录的应用研究初探<sup>1</sup>

齐玉妍 孙丽娜 张合 彭远黔

(河北省地震局, 石家庄 050021)

**摘要** 本文给出了唐山地区强震动记录应用研究的两个实例, 提出了建筑结构采用时程分析时选用强震动记录的原则和方法, 通过对唐山地区强震动记录的分析处理, 得到了其峰值加速度及加速度反应谱, 确定了本地区进行弹性时程分析时选用的强震动记录; 研究了局部场地条件对地震动影响的唐山响堂三维强震动观测台阵, 以唐山响堂台阵 2 号测井 (地下 32m) 的基岩强震动作为输入, 通过 2 号测井的土层剖面, 利用 2 个一维土层地震反应分析程序, 分别计算得到地表的峰值加速度和加速度反应谱, 并把计算结果与同次地震相应的地表强震动记录峰值加速度与加速度反应谱进行了对比分析。

**关键词:** 强震动记录 时程分析 三维台阵 土层地震反应

## 引言

强震动观测的目的在于通过对强震动记录的分析, 了解地震动与结构的反应特性, 以便研究结构物抗震问题 (胡聿贤等, 1998)。自强震仪问世以来, 强震动观测记录除了推动地震工程学的理论研究之外, 在实际应用上, 如工程抗震设计、结构反应分析等方面也发挥了重要作用 (曲哲等, 2011; 郭和等, 2009; 王国新等, 2012)。

唐山毗邻京津, 地处华北地区, 是我国大陆板内地震的多发区和重灾区, 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级大地震造成了巨大的人员伤亡和财产损失, 强震动观测从此发展起来。“九五”期间建成的首都圈烈度速报台网、唐山响堂三维强震动观测台阵以及后续新建和完善的京津冀强震台网等, 都获得了大量强震动记录。这些记录震相完整, 波形清楚, 计时准确, 为建筑结构工程的应用、研究局部场地条件对地震动影响等领域提供了宝贵的数据基础。本文收集整理了 1976 年以来京津冀地区数字强震动台网记录到的唐山地区地震的强震动记录, 确定了本地区进行弹性时程分析可以选用的强震动记录, 并研究了唐山响堂三维强震动观测台阵基岩地震动输入的土层反应计算与该地区的实际强震动记录对比。

## 1 强震动记录应用于本地区建筑结构时程分析

如何对地震动记录进行合理的选取与分析, 并在建筑结构时程分析中如何选择实际的强震动记录, 是强震动记录应用的一个方向。随着时代的进步和经济的发展, 如今的建筑物越来越高, 结构体系越来越复杂, 对这些建筑结构进行时程分析法计算是抗震结构设计可靠的

<sup>1</sup> 基金项目 河北省地震科技星火计划重点课题 (DZ20140711036) 和国家自然科学基金 (41274113) 资助

[收稿日期] 2015-05-06

[作者简介] 齐玉妍, 女, 生于 1981 年。工程师, 硕士。主要从事地震活动性与工程地震研究。E-mail: 15383018383@163.com

科学基础。我国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)对于特别不规则建筑、甲类建筑和超过一定高度的高层建筑地震动时程反应分析有明确的要求(中华人民共和国建设部,2001),然而规范对于如何选取地震动方面却未做详细说明,实际工作中工程设计人员往往忽略了对强震动记录适用性的判别。根据以往的设计经验发现,输入不同的地震动进行时程分析会得到不同的结果,甚至差别很大(杨溥等,2000;李英民等,2003)。因此,要保证时程分析结果的合理性,必须合理地选择输入强震动记录。

### 1.1 进行时程分析时实际强震动记录的选择

选用实际强震动记录进行时程分析时要满足地震动三要素的要求,即峰值、频谱特征和持时,并使地震动三要素和选择的强震动记录数量满足现行抗震设计规范规定。尽管很难选择到完全符合设计要求的强震动记录,但进行时程分析时,应尽量选取地质条件相似,频率大致一致的地震记录。

#### 1.1.1 根据建筑物抗震设防参数调整峰值加速度

强震动的峰值加速度可以从实际记录中直接得到,它是一条记录中最大的绝对峰值,通常用水平分量的记录。在一定程度上,强震动记录的峰值反映地震的强度,因此要求输入结构的地震加速度时程应与设防烈度要求的多遇地震或罕遇地震的地震加速度时程相当,为此在选取实际强震动记录时,峰值加速度过大或过小的记录不应考虑进来。在进行时程分析时,需要对地震记录进行调幅,使其峰值加速度达到规范要求。

#### 1.1.2 地震动持时

地震动持时是建筑结构受损、破坏、倒塌的重要因素之一(尤宇星等,2011)。地震动的持续时间不同,地震能量损耗便不同,结构地震反应也因此不同。时程分析法选用地震动持时的原则是:①地震动持时应包括地震记录最强烈部分;②若仅对结构进行弹性最大地震反应分析,持续时间可取短些;若对结构进行弹塑性最大地震反应分析或耗能过程分析,持续时间可取长些;③一般可考虑取持续时间为结构基本周期的5—10倍。

#### 1.1.3 根据工程特性选择反应谱频段

经大量地震记录统计分析发现,在反应谱整个频率段上进行控制是很难的。因而,将反应谱划分为若干个频率段,如:[0s, 0.1s]、[0.1s,  $T_g$ (s)]、[ $T_g$ (s),  $5T_g$ (s)]、[ $5T_g$ (s), 6s]等( $T_g$ 为建筑所在场地的特征周期),分别在每一段上进行控制,找出拟合条件最好的地震记录,这比在整个频段及在其他频段进行控制所选地震记录的计算结果要好得多。

#### 1.1.4 唐山地区现有强震动记录的应用

本文从1976年以来京津冀地区数字强震动台网强震仪的加速度型记录中,筛选出唐山地区3.3级以上地震48个,在不同类型(土层、基岩)的台基上记录到的172组加速度记录,这些强震动水平向峰值加速度范围为2.6—55.2gal,采样率均为0.004s,时程范围为19.456—28.672s。通过对强震动记录的数据处理,计算了其加速度反应谱,图1给出了3.3级以上唐山响堂三维强震动观测台阵记录到的7次地震地表水平向地震动加速度反应谱。7次地震的反应谱谱型相似,但峰值差异较大。比较两次震级较大的地震发现,虽然滦县 $M_L4.0$ 地震峰值加速度比陡河东 $M_L5.9$ 地震大,但是在0.04s之后陡河东地震加速度反应谱值明显高于滦县地震,另外考虑到唐山地区抗震设防烈度为VIII度,多遇地震时程分析所用地震加速度时程的最大值为70gal(中华人民共和国建设部,2001),故选择陡河东 $M_L5.9$ 地震强震动记录作为唐山地区工程场地进行多遇地震时程分析,即弹性时程分析的地震动输入。

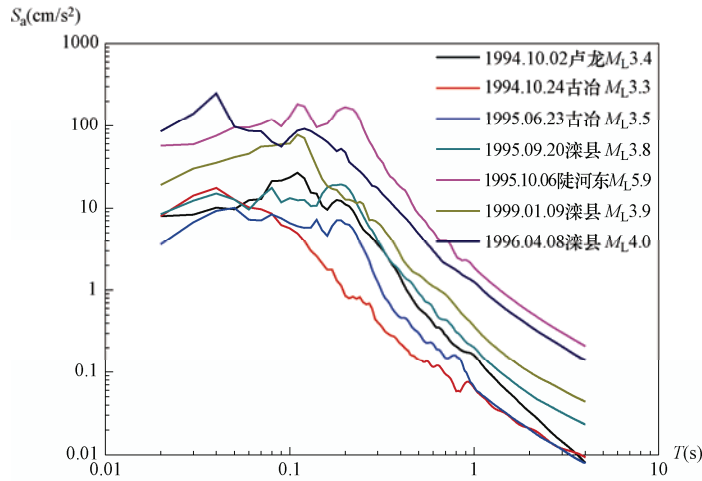


图 1 7 次地震地表水平向地震动加速度反应谱

Fig. 1 Response spectrum of ground motion acceleration of seven earthquakes horizontally

## 2 局部场地条件对唐山响堂三维强震动观测台阵地震动的影响

唐山响堂三维强震动观测台阵是 1994 年 7 月中国地震局工程力学研究所在唐山余震区建成的我国首个三维场地影响观测台阵。该台阵建成时有四个观测点，分别布设在基岩地表、土层地表、地下 17m（1 号测井）和地下 32m（2 号测井）处，目的在于获取中、强地震记录，研究局部场地条件对地震动的影响（谢礼立等，1999）。2001 年为了使台阵更为完整，中国地震局工程力学研究所对该台阵进行了扩建和改造，在地下 47m 处布设了新钻井（3 号测井），在地面和地下 47m 处基岩上布设了两个测点，同时对测井进行了土层剪切波速测量，并对土样进行了动力特性实验（周雍年等，2005；齐文浩等，2005）。

为了研究局部场地条件对地震动的影响，收集到了响堂井下台阵 1994 年 12 月 29 日—1999 年 12 月 31 日 44 次地震共 390 条强震动记录，本文采用响堂 2 号测井的土层剖面作为计算剖面（谢礼立等，1999），以实际记录到的井下 32m 处（2 号测井）的强震动记录作为地震动输入，采用一维土层剪切动力反应分析的等效线性化方法程序进行计算，为了对比分析，本文采用基于廖振鹏开发的应用程序 LSSRLI-1 的升级版 ESE 软件和 SHAKE91 的升级版 EERA2000 软件进行土层反应分析计算。各层土的容重、剪切模量比和阻尼比与剪应变的关系采用 3 号测井的结果近似取值（齐文浩等，2005），计算得出地表峰值加速度和加速度反应谱，并把这些计算结果与同次地震相应的地面强震动记录相比较，用强震动记录检验一维土层地震反应分析程序。

本文采用的 3 次强震动记录分别为 1995 年 10 月 6 日陡河东地震（ $M_L 5.9$ ）、1996 年 4 月 8 日滦县地震（ $M_L 4.0$ ）、1999 年 1 月 9 日滦县地震（ $M_L 3.9$ ），详细情况见表 1，对应每一次地震都有井下 32m 处和地表处的强震动记录。输入地震动、地表记录及程序计算所得加速度的峰值加速度如表 2 所示。从表 2 可以看出，无论是 ESE 软件还是 EERA2000 软件，计算得到的峰值加速度与地表土层实际记录峰值加速度值均有较大差异，计算值均较实际记录值小。土层地震反应分析程序计算所得的反应谱与地表强震动记录反应谱的比较如图 2 至图 4 所示。总体上 2 个程序的计算结果与强震动记录走向一致，只是在高频部分，ESE 软件与 EERA2000 软件计算得到的反应谱值较实际记录地表加速度所得的反应谱值小；而在长周期部分，程序

计算得的反应谱均较实际记录地表加速度所得到的反应谱宽。如果仅比较 ESE 软件与 EERA2000 软件计算的结果, EERA2000 软件计算得到的峰值加速度要大一点, 反应谱宽度要窄一些, 与实际强震动记录更接近。

分析导致一维土层地震反应计算结果较地表实际强震动记录峰值小、谱型宽的原因可能与台阵场地的地质条件有关。台阵场地的土质柱状图显示(谢礼立等, 1999), 场地土质松散, 故对地震波的放大作用较弱, 因此会使得土层地震反应分析得到的加速度反应谱较地表实际强震动记录峰值小, 同时谱型更宽。

表 1 强震动记录一览表

Table 1 List of the Strong motion records

台站名称	震中	震级 ( $M_L$ )	时间	震中位置	
				东经 ( $^{\circ}$ )	北纬 ( $^{\circ}$ )
唐山响堂井下	陡河东	5.9	1995.10.06 06:26	118.45	39.75
	滦县	4.0	1996.04.08 00:39	118.73	39.85
	滦县	3.9	1999.01.09 02:07	118.67	39.80

表 2 输入地震动(基岩记录)、地表记录及程序计算所得峰值加速度(gal)

Table 2 Peak ground acceleration of the input (bedrock records), ground records and the computed results by the program

震中	基岩记录	地表记录	ESE 计算结果(误差)	EERA2000 计算结果(误差)
陡河东 ( $M_L$ 5.9)	12.14	47.93	23.15 (51.7%)	28.27 (41.0%)
滦县 ( $M_L$ 4.0)	20.21	55.22	34.35 (37.8%)	38.58 (30.1%)
滦县 ( $M_L$ 3.9)	7.08	16.85	10.64 (36.9%)	13.21 (21.6%)

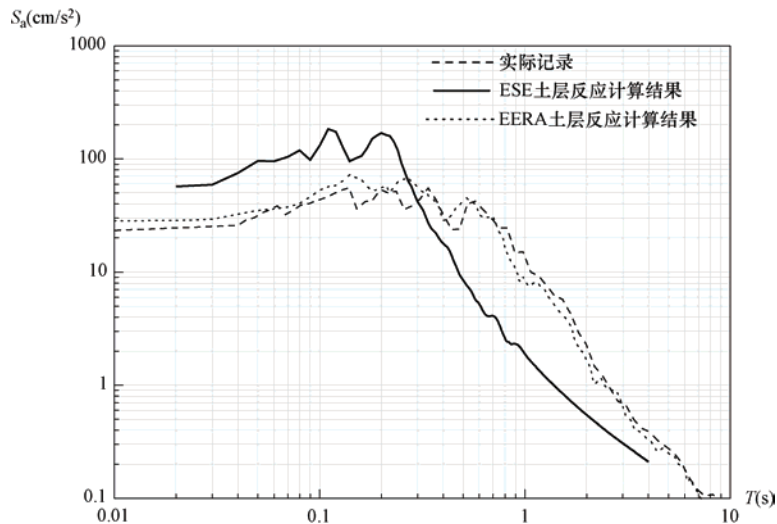


图 2 陡河东  $M_L$ 5.9 地震强震动记录与程序计算反应谱比较图

Fig. 2 The comparison of strong motion record and program response spectrum in the Douhedong  $M_L$ 5.9 earthquake

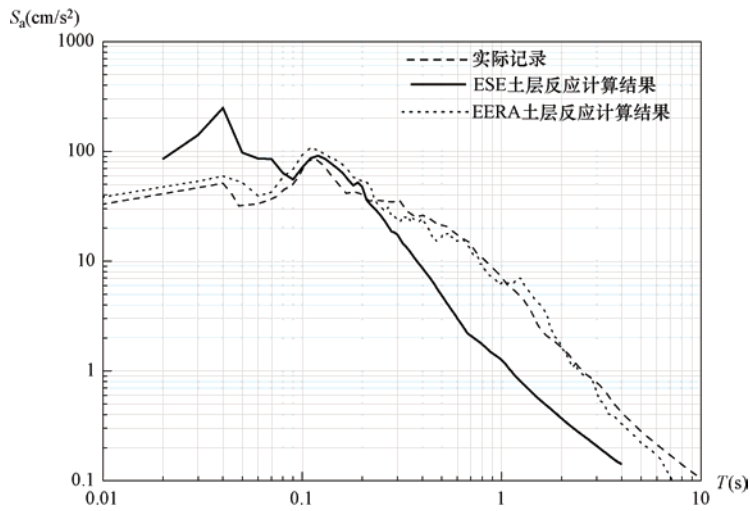


图3 滦县  $M_L 4.0$  地震强震动记录与程序计算反应谱比较图

Fig. 3 The comparison between strong motion record and program response spectrum in the Luanxian  $M_L 4.0$  earthquake

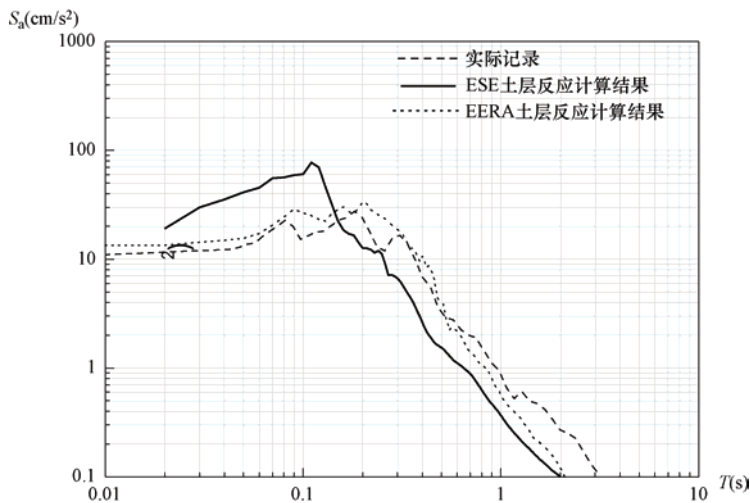


图4 滦县  $M_L 3.9$  地震强震动记录与程序计算反应谱比较图

Fig. 4 The comparison between strong motion record and program response spectrum in the Luanxian  $M_L 3.9$  earthquake

### 3 结论与讨论

本文初步研究了唐山地区强震动观测应用的两个实例。提出了建筑结构时程分析选用实际强震动记录的原则和方法，整理分析了唐山地区 3.3 级以上地震 48 个、172 组强震动记录，通过对强震动记录的分析处理，计算了其加速度及加速度反应谱，确定了陡河东  $M_L 5.9$  地震强震动记录作为唐山地区工程场地进行多遇地震时程分析，即弹性时程分析的地震动输入。

以唐山响堂台阵 2 号测井（地下 32m）的强震动作为输入，通过 2 号测井的土层剖面，

利用 2 个一维土层地震反应分析程序, 计算得到地表的峰值加速度和加速度反应谱, 并把这些计算结果与同次地震相应的地面强震动记录进行了对比。峰值加速度的对比发现, ESE 软件与 EERA2000 软件计算得到的峰值加速度与地表土层实际记录峰值加速度值有较大差异, 计算值均较实际记录值小。反应谱的对比发现, 在高频部分, ESE 软件与 EERA2000 软件计算得到的反应谱值较实际记录地表加速度所得的反应谱值小, 而在长周期部分, 程序计算得到的反应谱均较实际记录地表加速度所得到的反应谱宽。比较两个一维土层地震反应分析软件计算的结果, 发现 EERA2000 软件计算得到的峰值加速度要大一点, 反应谱宽度要窄一些, 与实际强震动记录更接近, 但是在目前的计算水平下, 考虑到两个程序计算结果差异不大, 都可满足工程上的计算需要。

## 参考文献

- 郭和, 崔建文, 辛灿等, 2009. 基于强震记录测定近场地震参数方法研究. 震灾防御技术, **4** (3): 340—346.
- 胡聿贤, 1998. 地震工程学. 北京: 地震出版社, 133—141.
- 李英民, 赖明, 白绍良, 2003. 工程结构的地震动输入问题. 工程力学 (增刊): 76—87.
- 齐文浩, 薄景山, 刘德东等, 2005. 强震动记录对三个土层地震反应分析程序的检验. 地震工程与工程振动, **25** (5): 30—33.
- 曲哲, 叶列平, 潘鹏, 2011. 建筑结构弹塑性时程分析中地震记录选取方法的比较研究. 土木工程学报, **44** (7): 10—21.
- 王国新, 鲁建飞, 2012. 地震动输入的选取与结构响应研究. 沈阳建筑大学学报, **28** (1): 15—22.
- 谢礼立, 李沙白, 章文波, 1999. 唐山响堂三维场地影响观测台阵. 地震工程与工程振动, **19** (2): 1—8.
- 杨溥, 李英民, 赖明, 2000. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标. 土木工程学报, **33** (6): 33—37.
- 尤宇星, 黄圣棕, 谢文杰, 2011. 建筑结构时程分析法中天然地震波的选择. 地震地磁观测与技术, **32** (4): 22—26.
- 周雍年, 谢礼立, 章文波等, 2005. 研究局部场地条件对地震动影响的响堂遥测台阵. 地震工程与工程振动, **25** (6): 1—4.
- 中华人民共和国建设部, 2001. 建筑抗震设计规范 (GB 50011—2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 31—32.

## The Preliminary Application of Strong Motion Record in the Tangshan Region

Qi Yuyan, Sun Lina, Zhang He and Peng Yuanqian

(Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract** Two examples of application on strong motion record in the Tangshan region was performed in this paper. We propose principles and methods on how to select strong motion records in time history analysis of building structures. And then the ground acceleration and acceleration response spectrum are obtained by analyzing strong motion records of Tangshan region, the applicative ground motion record is selected to be used in elastic time history analysis. We study the effects of surface soil conditions on seismic motion of Xiangtang three dimensional array, the bedrock strong motions of the 2<sup>nd</sup> well-logging bedrock as ground motion input. With the soil profile data, we obtain the ground acceleration time history and acceleration response spectrum by two one-dimensional soil layer seismic response programs. Finally, the comparative analysis of peak ground acceleration and acceleration response spectrum from soil layer seismic response analysis and strong motion records of the same earthquake are carried out.

**Key words:** Strong motion record; Time history analysis; Three-dimensional strong-motion array; Soil seismic response