

陆吉赞,路建波,周新民.爆炸波土层动力响应对比分析[J].地震工程学报,2019,41(2):412-417.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.412

LU Jiyun, LU Jianbo, ZHOU Xinmin. Comparative Analysis of Dynamic Responses of Soil Layers under Blast Wave[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 412-417. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.412

爆炸波土层动力响应对比分析

陆吉赞, 路建波, 周新民

(浙江省地震局, 浙江 杭州 310013)

摘要:以人工爆炸波为震源,通过现场测试获取基岩及土层的地震动参数,并采用等效线性化分析方法计算相应的地震动参数用于与实测结果进行对比分析。峰值加速度对比结果表明,等效线性化分析方法对于Ⅱ类场地的适应性较好,计算结果与实测结果非常接近,而Ⅲ类场地的计算结果与实测值之间存在较大的误差。加速度反应谱的对比结果表明,无论是计算结果还是实测记录,加速度反应谱的峰值均比基岩输入的要大,且土层反应计算的结果小于实际记录;加速度反应谱的宽度与场地类别关系密切,Ⅲ类场地明显比Ⅱ类场地要大,两类场地的计算结果也均小于实测值。

关键词:爆炸波;地震反应分析;峰值加速度;反应谱

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)02-0412-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.412

Comparative Analysis of Dynamic Responses of Soil Layers under Blast Wave

LU Jiyun, LU Jianbo, ZHOU Xinmin

(Earthquake Agency of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, Zhejiang, China)

Abstract: The ground motion parameters of bedrock and soils were acquired by field experiments, using an artificial blast wave as the seismic source. Field drilling was conducted and the corresponding data was obtained, and then, the seismic response analysis was carried out by equivalent linearization. The rationality of the conclusion is discussed through comparisons between the calculated and measured values. The peak acceleration comparison results show that the equivalent linearization method is better for class II sites, and the calculated values of surface peak acceleration match well with the measured values. For class III sites, there are relatively large discrepancies between the calculated and measured values, which vary with the overburden thickness. According to the comparison results of acceleration response spectrum, both the calculated and measured values of peak ground acceleration response spectrum are larger than

收稿日期: 2017-09-20

基金项目: 浙江省地震局支持立项课题

第一作者简介: 陆吉赞(1988-),男,硕士,助理工程师,主要从事地震工程方面的工程应用与理论研究。

E-mail: 822651938@qq.com.

those of bedrock input, and the measured values are greater than the calculated values. The width of the acceleration response spectrum is closely related to the site category, and the width of the acceleration response spectrum of class III site is significantly larger than that of class II site; moreover, the measured values of the two types of sites are both larger than the calculated values.

Keywords: blast wave; seismic response analysis; peak acceleration; response spectrum

0 引言

历次的震害表明,场地条件对于地震波的传播具有重要影响。因此如何确定场地与地震动参数之间的关系变得尤为重要,这也正是工程场地地震安全性评价工作中的重要组成部分。

强震观测和数值分析是研究场地地震动反应的两种主要方法。基于强震记录进行统计分析的方法最为直接,但其依赖于大量的强震资料,特别是岩土台阵的数字资料。在工程实践中,多采用数值分析的方法对地震动进行模拟分析。由于场地条件的复杂性,数值方法模拟的场地反应往往与实际观测数据之间存在较大的偏差^[1]。学者们也一直在利用实际的强震记录对现有的数值分析方法进行研究和改进^[2-6]。由于种种原因的限制,目前国内岩土台阵的数量依然很少^[1,6],相关的研究更多的是利用国外场地的数据进行分析,适应性有待商榷。

本文以人工爆破为震源,用强震仪进行现场试验,同时获取爆炸波在基岩和不同土层结构下的地震动波,用以分析上覆土层对爆炸波的作用,并通过理论分析与试验结果进行对比,探讨结果的合理性。研究成果将为少震弱震地区开展场地土层地震动反

应分析提供参考,具有较好的工程实用价值。

1 现场试验

根据试验实施的需要,试验场地选择在浙江近滨海一采石场及其周边,场地内既有基岩出露又有一定厚度的土层覆盖。现场试验包括爆破试验和场地钻孔剪切波速测试。

1.1 爆破试验

试验采用较大当量的炸药引爆作为震源,分别在距爆破源等距离的基岩场地和土层场地架设强震仪。由于测点与爆破源之间的距离相同,认为其基岩地震动相同,则经土层作用的地震动与基岩场地的地震动可进行对比分析。详细的测试方案见文献^[7],这里不再赘述。

测试仪器采用瑞士产的 GEOSIG 强震观测仪,该仪器可以同时记录三个分量的地震动加速度时程。本次试验共布设了 6 台强震器,本文分析所涉及的是其中 5 台仪器的数据,分别是距离震源同为 450 m 的基岩点 1 和 ZK1 土层点;距离震源同为 600 m 的基岩点 2 和 ZK2、ZK3 土层点。各测试点的场地情况见表 1。

爆破震源产生的爆炸波包括纵波和横波(剪切

表 1 试验点基本参数

Table 1 Parameters for test points

测点名称	基岩点 1	ZK1 点(土层)	基岩点 2	ZK2 点(土层)	ZK3 点(土层)
震源距/m	450	450	600	600	600
覆盖层厚度/m	0	26.3	0	27.0	46.5
场地类别	I ₀	II	I ₀	III	III

波)。由于工程上主要关心地震动的剪切波分量,本文用于分析的也主要是剪切波,因此这里只给出剪切波的数值。各测试点记录的峰值加速度列于表 2,实际波形见图 1。

1.2 地震钻孔及剪切波速测试

根据试验设计,在试验场地布设了三个地震钻孔,分别为距离震源 450 m 的 ZK1 钻孔及距离震源

表 2 地震动峰值加速度测试结果

Table 2 Test results of peak ground acceleration

测试点	基岩点(等距离)/g	实测值(剪切波)/g
ZK1	0.166(a)	0.238(c)
ZK2		0.168(d)
ZK3	0.138(b)	0.181(e)

600 m 的 ZK2 和 ZK3 钻孔,即在三台置于土层上的强震仪处布设相应的地震钻孔。三个钻孔都钻探至

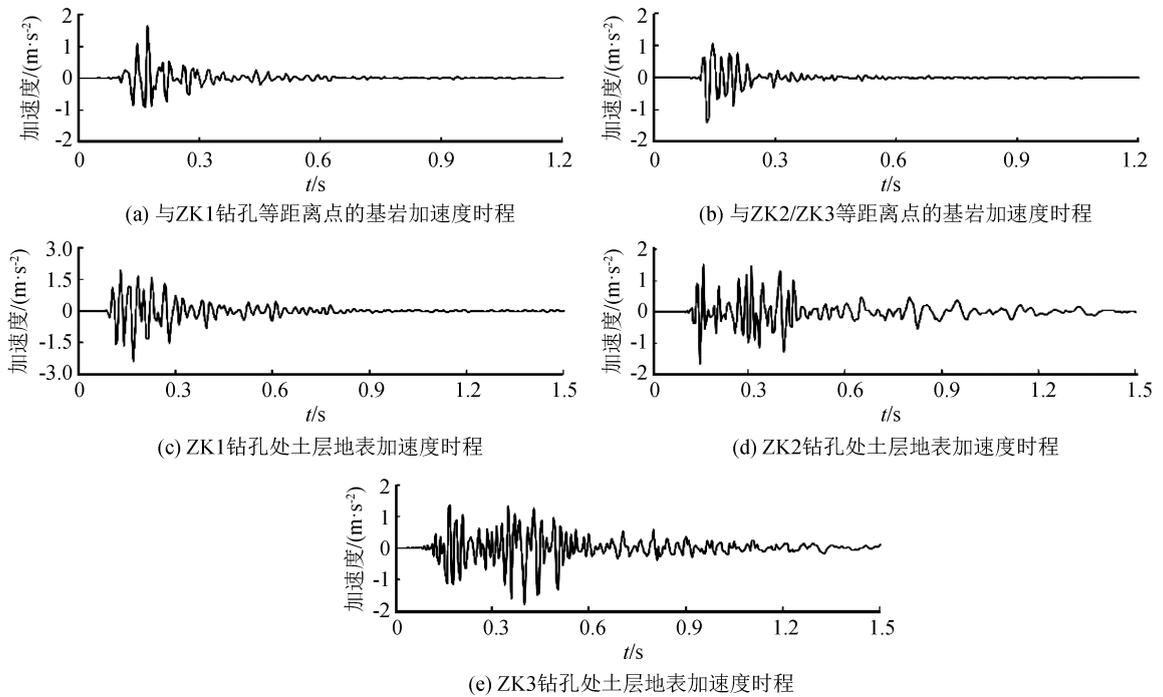


图1 各测点实测加速度时程

Fig.1 Measured acceleration time-history curves of test points

中风化基岩处,并进行了相应的土层剪切波速测试。对典型土层取样送试验室进行土动力测试,获取相应的剪切波速数据和土动力参数。

由于场地覆盖层变化较大,考虑到各种仪器的适用性,钻孔土层的剪切波速测试采用悬挂法和锤击法两者联合测试,以提高其测试的精确性。测试结果列于表3,场地类别判别的结果见表1。

2 土层反应分析

2.1 等效线性化反应分析程序

等效线性化土层地震反应分析方法是目前国内地震工程界广为运用的地震反应计算分析方法^[8]。相关的计算程序有多种,但原理基本相同,都可以满足一般工程实践的需要。为了与实际工程项目计算相一致,本文使用的是经中国地震局震害防御司验收推广的XQH软件包^[9],其中土层反应部分与EERA作过比较,差异可以忽略^[10]。这也是目前地震安全性评价中常用的计算软件包。

2.2 计算模型与参数

根据三个场地钻孔的钻探资料,结合剪切波速测试以及土工试验的数据建立相应的场地土层地震反应计算模型(表3)。

本文中的土动力参数由浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室测试完成,其余填土及风化岩参考推荐值^[11],具体参数列于表4。

3 结果对比分析

由表5可见,ZK1钻孔点的水平峰值加速度在基岩处为 $0.166g$,地表实测值为 $0.238g$,土层分析计算得到的值为 $0.248g$;ZK2钻孔点的水平峰值加速度在基岩处为 $0.138g$,地表实测值为 $0.168g$,土层分析计算得到的值为 $0.218g$;ZK3钻孔点的水平峰值加速度在基岩处为 $0.138g$,地表实测值为 $0.181g$,土层分析计算得到的值为 $0.140g$ 。

表5的数据显示,各点的地表水平峰值加速度的计算结果与实测结果存在误差。实测峰值加速度均比基岩的峰值加速度有所放大,ZK1、ZK2及ZK3三个测试点的放大系数分别为1.43、1.22和1.31。土层反应计算得到的峰值加速度值较基岩输入也有所放大,相应计算点的放大系数分别为1.49、1.58和1.01。对比实测与计算的结果,位于Ⅱ类场地的ZK1钻孔,计算得到的峰值加速度与实测值较为接近,误差为4.2%;而同处于Ⅲ类场地的ZK2和ZK3钻孔,土层反应分析得到的峰值加速度相对于基岩放大系数差别较大,与实测值之间的相对误差分别为29.8%和22.7%,这可能是由于覆盖层的厚度差别较大(27.0 m与46.5 m)造成的。由此可见,对于Ⅱ类场地,一维等效线性分析方法能够较好地反映土层对地震波的放大效应,模型计算得到的峰值加速度值与实测值非常接近。而对于覆盖层较厚、土

表 3 三钻孔场地土层地震反应计算模型

Table 3 Computational models for ZK1, ZK2, and ZK3

钻孔编号	层序	土层深度/m	土层描述	平均剪切波速/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)
ZK1	1	0~1.8	填土	111	1.80
	2	1.8~3.3	粉质黏土	127	1.78
	3	3.3~8.2	含碎石粉质黏土	161	1.78
	4	8.2~13.6	淤泥	162	1.68
	5	13.6~26.3	强风化凝灰岩	433	2.10
	6	26.3~31.7	中风化凝灰岩	665	2.30
ZK2	1	0~0.8	填土	114	1.80
	2	0.8~2.1	粉质黏土	131	1.78
	3	2.1~11.9	淤泥	118	1.68
	4	11.9~16.2	含碎石粉质黏土	218	1.90
	5	16.2~19.5	粉质黏土	258	1.81
	6	19.5~22.6	全风化凝灰岩	364	2.10
	7	22.6~27.0	强风化凝灰岩	454	2.10
	8	27.0~30.2	中风化凝灰岩	590	2.30
ZK3	1	0~2.0	粉质黏土	123	1.78
	2	2.0~12.6	淤泥	128	1.68
	3	12.6~27.7	粉质黏土	288	1.90
	4	27.7~39.3	粉质黏土	268	1.81
	5	39.3~46.5	强风化凝灰岩	447	2.10
	6	46.5~52.0	中风化凝灰岩	588	2.30

表 4 各类土的剪切模量比(G/G_{max})和阻尼比(λ)参数

Table 4 Shear modulus ratios (G/G_{max}) and damping ratios (λ) for different soils

土类	土性 (取样深度)	剪切模量 比阻尼比	剪应变 $\gamma_d / (\times 10^{-4})$							
			0.05	0.10	0.5	1.0	5.0	10	50	100
1	填土 (参考值)	G/G_{max}	0.960	0.950	0.800	0.700	0.300	0.200	0.120	0.100
		$\lambda / \%$	0.025	0.028	0.030	0.035	0.080	0.100	0.110	0.120
2	黏质粉土 (1.2~1.5)	G/G_{max}	0.988	0.976	0.896	0.820	0.539	0.403	0.167	0.036
		λ	1.200	1.580	1.720	0.000	1.950	2.210	3.340	9.550
3	淤泥 (6.4~6.7)	G/G_{max}	0.973	0.955	0.864	0.790	0.533	0.407	0.175	0.039
		λ	1.190	1.230	1.340	0.000	1.580	2.400	4.170	11.800
4	粉质黏土 (17.3~17.6)	G/G_{max}	0.993	0.983	0.890	0.796	0.470	0.333	0.125	0.025
		λ	1.530	1.930	2.630	0.000	2.940	3.720	5.540	12.630
5	粉质黏土 (30.9~31.2)	G/G_{max}	0.992	0.981	0.890	0.795	0.454	0.310	0.103	0.017
		λ	2.260	2.490	2.890	0.000	3.110	5.620	8.500	15.650
6	全/强风化岩 (参考值)	G/G_{max}	0.990	0.970	0.900	0.850	0.700	0.550	0.320	0.200
		λ	0.004	0.006	0.019	0.030	0.075	0.090	0.110	0.120
7	中风化基岩 (参考值)	G/G_{max}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		λ	0.004	0.008	0.010	0.015	0.021	0.030	0.036	0.046

表 5 各点地震动峰值加速度计算值与实测值对比

Table 5 Comparison between recorded and calculated values of peak ground acceleration

测试及计算点	基岩点/g	土层反应计算/g	计算放大系数	实测值/g	实测放大系数	误差/%
ZK1	0.166	0.248	1.49	0.238	1.43	4.2
ZK2	0.138	0.218	1.58	0.168	1.22	29.8
ZK3		0.140	1.01	0.181	1.31	22.7

层较软的Ⅲ类场地,一维等效线性方法适应性较差,计算得到的峰值加速度与实测值之间的误差较大。这也符合目前对于传统等效线性分析方法的认识。因此在工程实践中,特别是在Ⅲ类及Ⅳ类场地的计算中要注意深软土层对地震动的放大效应。

图 2 为各钻孔点的反应谱,包括实测地表反应谱和土层反应计算得到的反应谱。实测反应谱为实际测试获得的加速度时程经处理得到的反应谱,包含基岩点和土层点。从三组反应谱整体形状来看,实际记录得到的反应谱均比基岩及土层计算的反应

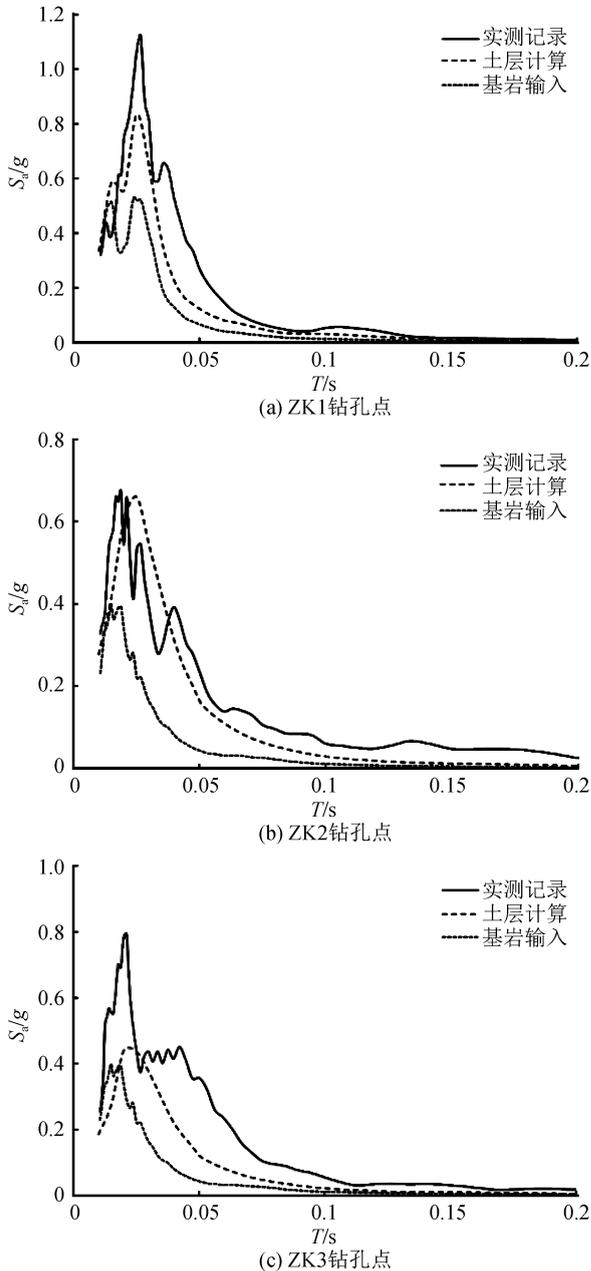


图2 钻孔各点的实测反应谱与计算反应谱的对比(包括基岩和土层反应)

Fig.2 Comparison between measured and calculated response spectra of drilling points

谱高,而且由低到高依次是基岩输入反应谱、土层反应谱、实际记录反应谱。从反应谱的高度来看,ZK1钻孔土层分析计算得到的反应谱峰值约为实测值的70%,而两者的峰值加速度误差只有4.2%;ZK2钻孔实测与计算得到的峰值加速度相差29.8%,而反应谱的峰值几乎一样;ZK3钻孔实测与计算得到的峰值加速度相差22.7%,而反应谱的峰值相差近45%。从反应谱的宽度来看,无论是实际记录的还是土层计算得到的反应谱,位于Ⅲ类场地的ZK2与

ZK3均比位于Ⅱ类场地的ZK1宽,即场地越软放大效应越明显。由此可见,场地对地震动反应谱有很大的影响,无论是反应谱的高度还是宽度都有一定的放大。但与实际测试的结果相比,土层反应分析计算的结果无论是反应谱的高度还是宽度均偏小,这为今后少震弱震地区的地震动反应分析提供了一定的参考。

4 结论与建议

通过实测数据与土层反应计算结果的对比分析,得到以下结论:

(1) 利用人工爆破记录对土层的地震动反应进行分析,并取得了一定的成果。此方法可为少震弱震地区的土层地震动反应研究提供参考。

(2) 峰值加速度的对比结果表明,等效线性化分析方法对于Ⅱ类场地的适应性较好,计算结果与实测结果非常接近;Ⅲ类场地的计算结果与实测值之间的误差较大,工程实践中要特别注意。

(3) 从加速度反应谱来看,土层计算与实测记录的峰值都比基岩输入要大,且实际记录大于土层反应计算的结果;反应谱宽度与场地类别关系密切,Ⅲ类场地明显比Ⅱ类场地要大,实际记录同样也大于理论计算的结果。

由于测试条件的限制,土层反应分析的基岩输入是根据与震源等距离的基岩场地确定的,不能完全替代钻孔位置真实的地震动输入,会给分析带来一定的误差。另外,波速测试数据和动三轴试验数据都会给分析结果造成影响,需要后续进行更多的研究。

参考文献(References)

- [1] 王海云.基于强震观测数据的土层场地反应的研究现状[J].地震工程与工程振动,2014,34(4):42-47.
WANG Haiyun. A Review of Study on Soil Site Response Estimating from Strong Motion Data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 42-47.
- [2] 李晓飞,孙锐,袁晓铭.基于实际记录的现有等效线性化分析程序对比研究[J].地震工程学报,2015,37(1):144-151.
LI Xiaofei, SUN Rui, YUAN Xiaoming. Comparative Study on Existing Equivalent Linear Analysis Programs Based on KiK-net[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 144-151.
- [3] 章文波,谢礼立,郭明珠.利用强震记录分析场地的地震反应[J].地震学报,2001,24(6):604-614.
ZHANG Wenbo, XIE Lili, GUO Mingzhu. Estimation on Site Amplification from Different Methods Using Strongmotion Da-

- ta Obtained in Tangshan, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 24(6): 604-614.
- [4] 齐文浩, 薄景山, 刘德东, 等. 强震记录对三个土层地震反应分析程序的检验[J]. *地震工程与工程振动*, 2005, 25(5): 30-33.
QI Wenhao, BO Jingshan, LIU Dedong, et al. A Test for Three Programs of Soil Layer Seismic Response Analysis by Strong Earthquake Record[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 25(5): 30-33.
- [5] 刘峥, 徐永林, 王绍博, 等. 用强震记录检验深厚土层小应变下一维等效线性化土层地震反应[J]. *震灾防御技术*, 2011, 6(4): 372-383.
LIU Zheng, XU Yonglin, WANG Shaobo, et al. Research on One Dimensional Equivalent Linear Seismic Response of Deep Soil Based on the Strong Motion Record at Small Strain[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2011, 6(4): 372-383.
- [6] 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.
XU Yonglin, XIONG Lijun, ZHANG Chun, et al. A Study on Amplification Response of Soil Ground Motion in Shanghai Using Strong Motion Records[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(6): 662-666.
- [7] 周新民, 路建波, 徐平. 弱震区土层对基岩峰值加速度放大效应的试验研究[J]. *地震工程学报*, 2015(4): 952-955.
ZHOU Xinmin, LU Jianbo, XU Ping. Experimental Study on the Amplification Effect of Bedrock Peak Acceleration Caused by the Soil Layer in a Weak Shock Region[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015(4): 952-955.
- [8] 齐文浩, 薄景山. 土层地震反应等效线性化方法综述[J]. *世界地震工程*, 2007, 23(4): 221-226.
QI Wenhao, BO Jingshan. Summarization on Equivalent Linear Method of Seismic Responses for Soil Layers[J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2007, 23(4): 221-226.
- [9] 沈建文, 蔡长青, 邱瑛. XQH1.00 地震安全性评价工作程序包简介[J]. *地震学刊*, 1997(1): 46-52.
SHEN Jianwen, CAI Changqing, QIU Ying. Software Package of Seismic Microzonation XQH 1.00[J]. *Journal of Seismology*, 1997(1): 46-52.
- [10] 沈建文, 刘峥, 石树中. 用震级和距离参数修正土层反应的等效线性化方法[J]. *地震学报*, 2010, 32(4): 466-475.
SHEN Jianwen, LIU Zheng, SHI Shuzhong. Modify Equivalent Linear Method of Finding Soil Seismic Response with Magnitude and Distance Parameters[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2010, 32(4): 466-475.
- [11] 廖振鹏. 地震小区划: 理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
LIAO Zhenpeng. *Seismic Microzonation: Theory and Practice* [M]. Beijing: Seismological Press, 1989.