弱震区土层对基岩峰值加速度放大效应的试验研究①

周新民[1]，路建波[1]，徐 平[2]
（1.浙江省地震局，浙江 杭州 310013；2.郑州大学交通运输工程系，河南 郑州 450002）

摘要：以人工爆炸波作为震源，通过现场试验获得基岩和土层场地爆炸波地震动时程，分析场地覆盖层厚度对基岩地震动峰值加速度和地震动持时的放大效应。试验结果表明：土层对基岩地震动有放大作用，基岩峰值加速度放大系数受覆盖层厚度和土层结构的共同作用影响；地震动持续时间随覆盖层厚度的增加而显著增加，受覆盖层土层结构影响不显著。

关键词：爆炸波；土层结构；峰值加速度；放大效应
中图分类号：P315 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2015)04－0952－04
DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2015.04.0952

Experimental Study on the Amplification Effect of Bedrock Peak Acceleration Caused by the Soil Layer in a Weak Shock Region

ZHOU Xin-min[1], LU Jian-bo[1], XU Ping[2]
(1.*Earthquake Administration of Zhejiang Province*, *Hangzhou* 310013, *Zhejiang*, *China*;
2. *Department of Transportation Engineering*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450002, *Henan*, *China*)

Abstract: Using an artificial blast wave as the seismic source, the blast-induced ground motion time histories of both rock and soil sites were acquired by field experiments. The effects of soil layer amplification on peak ground acceleration and ground motion time histories were analyzed. The test results show that the soil layers amplify earthquake motion and that the amplification ratios are influenced by the depth and the construction of the soil layer. The depth of a soil layer has a large effect on the ground motion time history, but the construction does not.

Key words: blast wave; soil layer construction; peak acceleration; amplification effect

0 引言

研究场地覆盖土层对地震动的响应，科学合理地给出场地设计地震动参数对工程抗震设计有重要的现实意义。场地覆盖土层结构，尤其是近地表的土层对基岩地震动引起的地表地震动效应有着重要的影响[1-4]。近年来学者从工程实际角度出发研究了近地表土层结构对地表地震动参数的影响，重点分析了土层厚度对地震动的显著影响[5-7]，也有学者根据不同场地类别总结了土层厚度对基岩地震动峰值加速度的放大系数[8]。

如何检验某地区土层结构动力响应研究成果的合理性是目前面临的一个重要问题。最理想的方法是由实际监测仪器记录到的天然地震动数据验证土层动力响应理论成果最理想，国外也有学者曾经对天然地震数据进行收集整理，得到了基岩峰值加速度放大的统计成果[9-10]。但对我国而言，由于实际大地震发生的不确定性，以及监测台站分布不均等各种原因，实际地震记录很少，尤其要获取浙江省这类弱震区实际的天然地震动记录更是异常困难。

本文通过研究爆破震动特点，设计以人工爆破为震源，在浙江弱震区通过现场试验研究土层条件

① **收稿日期**：2014-08-20
基金项目：国家自然科学基金项目(51008286，51278467)；浙江省地震局支持立项课题
作者简介：周新民(1976－)，男，博士，高级工程师，主要从事工程抗震、地震工程及土动力学等方面相关的理论与工程应用研究。E-mail:changanzxm@163.com。

对基岩地震动的响应规律，得到不同覆盖层厚度下基岩地震动峰值加速度和地震动持时放大系数，以期为合理确定场地设计地震动参数提供借鉴，同时也为弱震区地震动问题的现场试验研究提供思路。

1　试验概况

本文试验为现场试验，主要是通过同时获得基岩地震动及土层条件对该基岩地震动放大后的地震动数据进行对比，分析土层条件对基岩地震动的放大效应。为了更好地模拟天然地震动特征，获得足够大的震动能量，试验震源采用炸药爆破。该炸药量为 2.8 T，分五口井装药，呈梅花形布置，炸药埋深为 81～85 m，采用同时引爆。

试验原理为选取距爆破源同等距离的基岩场地和土层场地架设强震仪，由于测点距爆破源距离相同，认为其基岩地震动相同，则经土层放大的地震动与基岩场地的地震动具有一致可比性。试验原理如图 1 所示。

图 1　试验原理简图

Fig.1　Test principle

采用瑞士生产的 GeoSIG 强震仪，该仪器为三分量强地震动监测仪，可以同时记录三个分量的地震动加速度时程。

爆破震源产生的爆炸波包括纵波和剪切波，以震源为圆心，沿径向记录到的波为纵波，而沿切向分量的记录则为剪切波。由于工程上主要关心地震动的剪切波分量，因此在测试仪器架设时令 X 方向指向震源，则 Y 方向分量即为地震动剪切波。

2　试验场地

2.1　试验场地选择

选取合理的试验场地是试验成功的重要保证。为了得到理想的既有基岩出露又有一定覆盖层厚度的试验场地，通过分析地貌和地层变化特征，选取浙江近滨海的位置作为试验场地。在该场地共设置 6 个测试点，包括爆破源在内 3 个基岩测试点和 3 个土层测试点。试验场地及各测试点的分布见图 2。

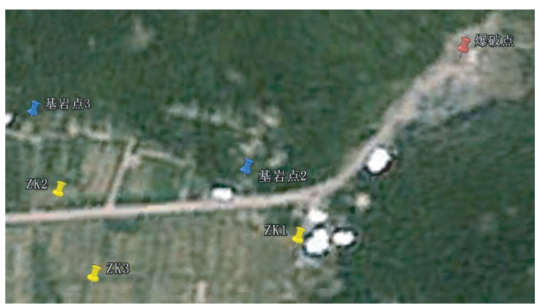

图 2　试验场地及测试点布置示意图

Fig.2　Test site and the test points arrangement

2.2　试验场地测试条件

试验场地山体内有一采石场，且山体周围存在不少基岩裸露点，是理想的爆破点和基岩测试点。随着远离山体，覆盖层厚度逐渐增大，在距离爆破源等距离选择了三个土层测试点，并对其点位进行钻探及取样、测试工作，得到测试点场地的覆盖层厚度、剪切波速、场地类别等参数。土层点的覆盖层厚度和场地类别存在差异性，符合试验要求。

场地各测试点的基本参数如表 1 所列。

表 1　试验测试点的基本参数

Table 1　Parameters for test points

测点名称	基岩点 1(爆破点)	基岩点 2	ZK1 点(土层)	基岩点 3	ZK2 点(土层)	ZK3 点(土层)
震源距/m	-	450	450	600	600	600
覆盖层厚度/m	0	0	24.5	0	26.2	46.5
场地类别	I_0	I_0	Ⅱ	I_0	Ⅲ	Ⅲ

为了测定不同峰值加速度的放大效应，试验共设计两个震源距离的基岩测试点。考虑到爆炸波随距离的几何衰减较快，试验点的震源距不宜过大，因此本次试验选择了基岩点 2(震源距 450 m)和基岩点 3(震源距 600 m)。

试验中考虑了不同覆盖层厚度对地震动的放大效应结果，因此测点设计时在同一震源距离下选择了不同覆盖层厚度的土层场地。450 m 震源距由于距离山体较近，仅选择了一个土层测试点(ZK1 点)，600 m 震源距则选择了两个土层测试点(ZK2 点和 ZK3 点)。

根据钻探及测试资料，三个土层测试点覆盖层厚度 ZK1 点为 24.5 m、ZK2 点为 26.2m 和 ZK3 点为 46.5 m，所处的场地类别 ZK1 点为Ⅱ类场地，

ZK2 点和 ZK3 点均为Ⅲ类场地。

3 现场测试及试验结果

3.1 现场测试安排

为了避开环境震动对测试结果的干扰，试验选择在晚间凌晨进行。先进行测点定位，完成炸药安装后进行测试点强震仪器的安装。强震仪安装的关键是要确保强震仪的加速度计与地面接触紧密，对基岩点采用石膏固定，对土层点则采用埋压的方式固定。为了保证测试数据的完整性，将仪器时间调整为统一时间，在炸药引爆前一小时开机待测，测试人员远离测试点，爆炸结束记录完成十分钟以后再收仪器。

3.2 试验结果

试验结束后，采用仪器自带的分析软件对数据进行处理。测试数据为三分量的加速度地震动时程，根据前文所述，本次试验主要针对剪切波进行分析。各测试点的峰值加速度数据列于表 2。

表 2 峰值加速度测试结果

Table 2 Test results of peak ground acceleration

加速度分量	震源	基岩点 2	ZK1	基岩点 3	ZK2	ZK3
X-方向/*g*	0.61	0.207	0.179	0.144	0.299	0.154
Y-方向/*g*	0.73	0.166	0.238	0.138	0.168	0.181
Z-方向/*g*	0.74	0.203	0.575	0.142	0.729	0.468

由表 2 可知，现场测试共得到三个方向的峰值加速度结果。根据前文所述，*Y* 方向为爆破源与测试点连线的切向分量，即剪切波分量。下面主要对 *Y* 方向的测试结果进行分析。

由表中可见，震源位置地表峰值加速度为 0.73*g*，基岩点 2(450 m 处)测试结果为 0.166*g*，而基岩点 3(600 m 处)为 0.138*g*，可见随着远离震源，基岩峰值加速度随距离衰减迅速。

同等震源距离下三个土层场地的测试结果均大于基岩点的测试结果，ZK1 测试点(450 m 处)地表峰值加速度为 0.238*g*，比基岩值放大了 44%；ZK2 测试点和 ZK3 测试点(均为 600 m 处)地表峰值加速度分别为 0.168*g* 和 0.181*g*，分别比基岩值放大了 21%和 31%，表明该三个土层场点的土层对地震动均为放大作用。同时也可以看出，ZK2 和 ZK3 在震源距相同的情况下峰值加速度也不相同，表明覆盖层厚度对峰值加速度影响显著。

3.3 峰值加速度放大系数分析

为了进一步分析土层条件对基岩地震动的放大效应，将各测点的基岩峰值加速度放大系数(即地表峰值加速度与基岩峰值加速度之比)进行统计，并将覆盖层厚度与放大系数的关系绘于图 3。

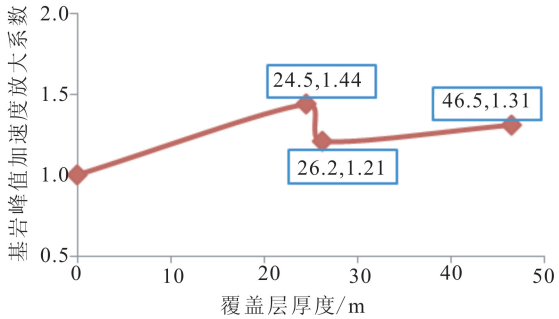

图 3 覆盖层厚度与基岩峰值加速度放大系数关系

Fig.3 Relationship between overburden thickness and peak acceleration amplification factor of bedrock

由图 3 可见，ZK1 点峰值加速度放大系数最大，为 1.44，ZK2 与 ZK3 点的放大系数接近，分别为 1.21 和 1.31。可见峰值加速度放大系数与覆盖层厚度并不是成线性关系。由表 1 可知，ZK1 与 ZK2 点厚度相近，但是放大系数相差甚多，差距达 19%，原因是 ZK1 点为Ⅱ类场地，ZK2 为Ⅲ类场。分析认为放大系数除覆盖层厚度影响外，还受土层结构影响显著，这与前人研究的理论结果相一致。

ZK2 和 ZK3 点均为Ⅲ类场地，但随着覆盖层厚度的增加，放大系数增加，说明同类工程场地下放大系数与覆盖层厚度成正比增加。

3.4 地震动持续时间分析

根据试验记录的加速度时程，得到各测试点的地震动持续时间，震源地震动持续时间约为 1 s，其他各测点的结果如图 4 所示。

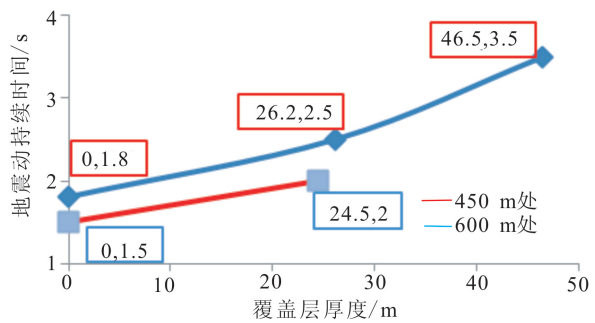

图 4 覆盖层厚度与地震动持时的关系

Fig.4 Relationship between overburden thickness and ground motion duration

由图 4 可见，随着远离震源，基岩地震动持时逐渐增加，从 1 s 增加到 1.5 s 和 1.8 s，但从图中可知覆盖层厚度对地震动持时的影响要远大于基岩的几

何距离放大作用。随着覆盖层厚度的增加，地震动持续时间几乎呈线性增加，由 600 m 处测试结果可知，覆盖层厚度从 0 增加到 46.5 m，地震动持续时间从 1.8 s 增加到 3.5 s，约为基岩地震动持时的 2 倍。地震动持续时间的增加，意味着地面工程将承受更长时间的地震动荷载，工程建筑的地震破坏性将大大增加，因此研究覆盖层厚度对地震动持时影响对工程抗震设计有重要意义。

图 5 给出了地震动持时放大系数与覆盖层厚度的关系。由图可见，地震动持时放大系数随着覆盖层厚度的增加而近于呈线性增加，由 ZK1 和 ZK2 点的结果看，二者场地类别不同但覆盖层厚度接近，持时放大系数分别为 1.33 和 1.39，结果也相近，说明场地类别对地震动持时的影响远小于覆盖层厚度的影响，进一步说明覆盖层的土层结构对地震动持时影响不显著。

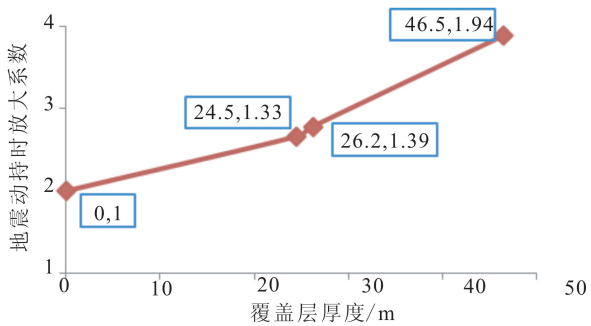

图 5　覆盖层厚度与地震动持时放大系数关系

Fig.5　Relationship between overburden thickness and amplification factor of ground motion duration

4　结论与建议

通过开展现场试验研究了弱震区土层对基岩地震动峰值加速度的放大效应，同时得到土层对地震动持时的相关成果。初步结论与建议如下：

（1）弱震区利用爆破震动作为震源进行土层地震动响应研究可以取得较理想的结果。

（2）Ⅱ、Ⅲ类场地覆盖层对基岩地震动均有放大作用，放大系数除受覆盖层厚度影响外，也受到覆盖层土层结构的显著影响。Ⅲ类场地放大系数随覆盖层厚度增加而增加。

（3）地震动持续时间随土层厚度的增加而显著增加，受覆盖层厚度影响显著，覆盖层的土层结构对地震动持时的影响不明显。

本文仅根据试验数据给出了一些初步的分析结论供参考，针对本次试验及测试成果数据还将作更深一步的分析。

参考文献(References)

[1] 刘峥，沈建文，石树中，等.软土对基岩峰值加速度的放大作用[J].同济大学学报：自然科学版，2009，37(5)：607-611.
LIU Zheng，SHEN Jian-wen，SHI Shu-zhong，et al. Soft Soil Amplification of Peak Ground Acceleration[J]. Journal of Tongji University：Natural Science，2009，37(5)：607-611.（in Chinese）

[2] 曹均锋，童远林，李光，等.软弱土层对场地地震动峰值的影响[J].地震研究，2013，36(2)：192-197.
CAO Jun-feng，TONG Yuan-lin，LI Guang，et al.Effect of Soft Soil Layer on Ground Motion Peak[J].Journal of Seismological Research，2013，36(2)：192-197.(in Chinese)

[3] Dobry R，Borcherdt R D，et al.New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions[J].Earthquake Spectra，2000，16(1)：41-47.

[4] Kwok A O L，Stewart J P，Hashash Y M A.Nonlinear Ground-response Analysis of Turkey Flat Shallow Stiff-soil Site to Strong Ground Motion[J].Bulletin of the Seismological Society of America，2008，98(1)：331-343.

[5] 李秀领.土层结构对地表地震动参数影响的研究[D].哈尔滨：中国地震局工程力学研究所，2003.
LI Xiu-ling.Study on the Effect of Soil Layer Conditions on the Seismic Ground Motion[D]. Harbin：Institue of Engineering Mehanics，China Earthquake Administration，2003.（in Chinese）

[6] 高玉峰，刘汉龙，朱伟，等.剪切波速对砂土层地震反应的影响[J].工程勘察，2001(1)：39-42.
GAO Yu-feng，LIU Han-long，ZHU Wei，et al. Influence of Shear Wave Velocity on Sand Seismic Response[J].Engineering Survey，2001(1)：39-42.(in Chinese)

[7] 薄景山，李秀领，刘红帅.土层地表加速度峰值的影响[J].地震工程与工程振动，2003，23(3)：35-40.
BO Jing-shan，LI Xiu-ling，LIU Hong-shuai. Effects of Layer Construction on Peak Accelerations of Ground Motions[J]. Journal of Earthquake Engineer and Engineering Vibration，2003，23(3)：35-40.(in Chinese)

[8] 刁瑭.山东Ⅱ、Ⅲ类场地地震动峰值加速度放大效应分析[J].中国地震，2011，27(1)：92-98.
DIAO Ting. Exploration for Amplification Effects of Peak Ground Motion in the Sites of Types Ⅱ and Ⅲ in Shandong Province[J]. Earthquake Research in China，2011，27(1)：92-98.(in Chinese)

[9] Singh S K，Mena E，Castro R.Some Aspects of Source Characteristics of the 19 September 1985 Michoacan Earthquake and Ground Motion Amplification in and Near Mexico City from Strong Motion Data[J].BSSA，1988，78：451-477.

[10] Celebi M.Topographical and Geological Amplifications Determined from Strong-motion and Aftershock Records of the 3 March 1985 Chile Earthquake[J].BSSA，1987，77：1147-1167.