

软弱土层对场地地震动峰值的影响^{*}

曹均锋, 童远林, 李光, 冯伟栋, 孟凡月, 赵朋, 董双林

(安徽省地震局, 安徽 合肥 230031)

摘要:以江淮地区某软土场地为原型, 构造多种场地土层地震反应分析模型, 选择 Taft (1952N21E)、Kobe (1995EW) 和 El-Centro (1940NS) 3 条强震记录作为地震动输入, 采用一维频域等效线性化波动方法重点分析了软弱层的埋深、厚度对软土场地地表加速度峰值的影响。结果表明: 对于给定的输入地震动, 地表加速度峰值及土层放大系数随着软弱层埋深、厚度的增加而逐渐减小; 当软弱层的埋深、厚度超过一定值时, 软土场地开始出现减震效应, 软弱层的埋深越深、厚度越大、输入地震动强度越高, 减震的效果越明显。

关键词:软弱土层; 埋深; 地震动; 放大系数; 加速度峰值

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)02-0192-06

0 引言

安徽的许多重大建设项目位于长江、淮河等水系的沿岸地区, 这些地区广泛分布着淤泥、淤泥质土等软弱沉积层。这些软弱层的存在使得场地地基承载力降低, 场地的卓越周期变长。历次震害表明, 由于场地土卓越周期与结构的自振周期较接近, 地震时易产生共振, 使得软土地地上的自振周期较长的高层建筑、大型桥梁等易发生严重震害, 如 1985 年墨西哥 $M_s 8.1$ 地震导致距震中约 350 km 的墨西哥城内数百座高层建筑遭受严重破坏或倒塌。可见软土层对地震动输入的响应不仅是一个极为复杂的土动力学问题, 还关系到重大建设工程的抗震设防, 因此软土地地震效应研究受到国内外学者的广泛关注。相关研究表明, 软弱夹层对地震动峰值的影响与软弱层的位置、厚度、输入基岩地震动特征及覆盖土层的厚度等因素有关 (黄玉龙等, 2000; 李小军等, 2001; 薄景山等, 2003; 袁丽侠, 2003; 吕悦军等, 2004; 黄雨等, 2005; 刘峥等, 2009)。

笔者以江淮地区某软土场地为原型, 按照软弱层位置、厚度的差异构造多种场地土层地震反应分析模型, 重点分析了软弱层的位置、厚度对场地地表加速度峰值的影响, 以期合理确定安

徽及同类地区的重大建设工程抗震设防要求提供参考。

1 分析方法和基本计算参数

场地土层地震反应分析计算的方法较多, 如线弹性波动 (及振动) 分析法、等效线性化波动分析法、直接时域非线性积分分析法等。工程上广泛采用的方法是一维频域等效线性化波动方法, 该方法是在总体动力学效应大致相当的意义上用一个等效的剪切模量和阻尼比代替所有不同应变幅值下的剪切模量和阻尼比, 将非线性问题转化为线性问题, 利用频域线性波动方法求解 (齐文浩, 薄景山, 2007)。笔者在土层地震反应分析中运用该方法。

笔者利用某软土场地钻孔资料, 结合一维频域等效线性化波动方法, 确定一个覆盖层厚为 50 m 的典型软土场地剖面作为基本计算剖面 (董娣等, 2006)。该剖面由厚度不等的 9 类土组成, 各土层的厚度、密度及剪切波速由所选择钻孔实测资料给出, 详见表 1。土层非线性动力参数主要是通过现场取典型土样进行动三轴实验得到的, 部分土层动力参数采用袁晓铭等 (2000) 给出的经典推荐值。

根据输入地震动的相关选取原则, 本次选取了

^{*} 收稿日期: 2012-10-29.

基金项目: 安徽省地震科研青年基金项目 (20120707) 资助.

Taft (1952N21E) (美国克恩县 7.7 级地震, 日本建筑中心台站)、Kobe (1995EW) (美国帝王谷 7.0 级地震, 爱尔森特罗台站) 和 E1-Centro (1940NS) (日本阪神 7.2 级地震, 日本海洋地震观测台) 3 条符合要求的实际强震记录 (图 1), 选取的持时均为

表 1 计算剖面的基本参数
Tab. 1 Basic parameters of the calculating profile

层号	土类	顶板埋深 /m	厚度 /m	密度 /kg·m ⁻³	剪切波速 /m·s ⁻¹
①	淤泥质粉质粘土	0	2.0	1 720	115
②	粉质粘土	2.0	2.0	1 900	152
③	粉质粘土夹粉砂	4.0	6.0	1 910	183
④	粉砂	10.0	8.0	1 860	188
⑤	细砂	18.0	16.0	1 920	212
⑥	中砂	34.0	4.0	2 030	243
⑦	细圆砾土	38.0	8.0	2 080	379
⑧	强风化泥质粉砂岩	46.0	4.0	2 100	473
⑨	中风化泥质粉砂岩			2 150	562

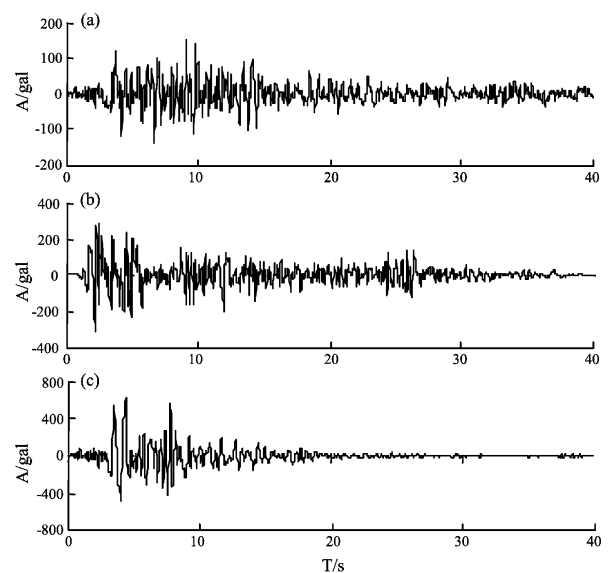


图 1 3 条基岩输入强震记录
(a) Taft (1952N21E) 波; (b) E1-Centro (1940NS) 波; (c) Kobe (1995EW) 波
Fig. 1 Three strong motion recordings as the bedrock inputting
(a) Taft (1952N21E) wave; (b) E1-Centro (1940NS) wave; (c) Kobe (1995EW) wave

40 s。将强震记录的加速度幅值均分别调整为 50、100、200 和 400 gal, 并将幅值缩小一半作为基岩的地震动输入。

2 软弱层埋深对场地地表峰值加速度的影响

将基本计算剖面中的第①层 2.0 m 厚的淤泥质粉质粘土作为软弱夹层不断变换位置, 依次放置场地不同的顶板埋深处。软弱夹层的顶板埋深从 0 m、4 m、8 m 依次变换到 48 m, 其余土层作相应的调整, 但覆盖层厚度始终保持 50 m, 共构造 13 个剖面, 然后选取不同幅值的 Taft (1952N21E)、Kobe (1995EW) 和 E1-Centro (1940NS) 波作为输入地震动, 对 156 个工况进行土层地震反应分析。场地地表峰值加速度 A_{\max} 取同一峰值下 3 条输入波分析结果的均值, 并将 A_{\max} 与相应输入基岩地震动幅值之比作为土层放大系数 k (表 2、图 2)。

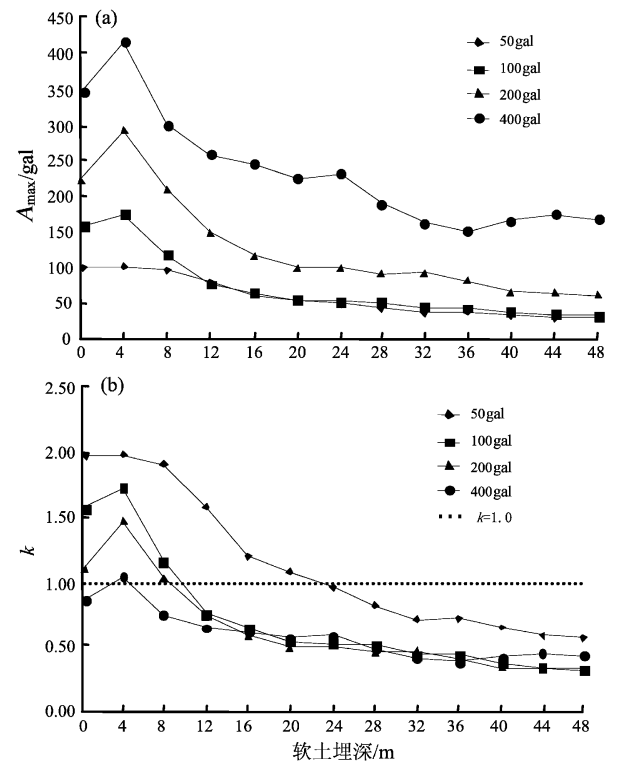


图 2 软弱层的埋深对场地地表峰值加速度 A_{\max} (a) 及放大系数 k (b) 的影响
Fig. 2 Effect of the depth of soft layer on acceleration peak A_{\max} (a) and amplification factor k (b)

表 2 不同埋深下的土层放大系数 k
Tab. 2 Amplification factors k under different burying depth

输入峰值 /gal	软弱层顶板埋深												
	0 m	4 m	8 m	12 m	16 m	20 m	24 m	28 m	32 m	36 m	40 m	44 m	48 m
50	1.97	1.98	1.90	1.58	1.20	1.08	0.96	0.83	0.71	0.72	0.64	0.57	0.56
100	1.57	1.73	1.17	0.76	0.64	0.53	0.52	0.50	0.43	0.42	0.37	0.33	0.31
200	1.10	1.47	1.04	0.74	0.58	0.49	0.50	0.45	0.46	0.40	0.33	0.32	0.30
400	0.87	1.04	0.75	0.64	0.61	0.56	0.58	0.47	0.40	0.38	0.41	0.43	0.42

从图 2 可以看出：（1）对于给定的软弱层埋深和厚度，输入基岩地震动峰值越大，地表加速度峰值 A_{\max} 越大，土层放大系数 k 越小；（2）在同等的输入地震动条件下，软表层（软弱层埋深 0 m 处）的地表峰值加速度 A_{\max} 和放大系数 k 小于软弱层埋深 4 m 处的计算结果。表明软表层对基岩加速度峰值的放大效应要稍弱于剖面顶部的软夹层；（3）当软弱层位于剖面顶部时，对基岩加速度峰值有着明显的放大作用，随软弱层埋藏深度的增加，地表峰值加速度 A_{\max} 和放大系数 k 逐渐减小；当软弱层的埋藏深度大于 20 m 时，软弱层埋深的对 A_{\max} 及 k 的影响已不显著；（4）对于给定的输入地震动，当软弱层埋深超过临界深度 D 值时，土层放大系数 k 开始小于 1.0，即表示软弱层开始起到减震作用，因为受软弱土的非线性变形特性影响，大量地震波能量耗散，地表地震动峰值降低。软弱层临界埋深 D 值的确定与土层结构及输入地震动大小有关，临界深度 D 随着输入地震动峰值的增大呈逐渐减小的趋势。

3 不同埋深处软弱层厚度对场地地表峰值加速度的影响

为分析软弱层位于覆盖层的表面、顶部、中部、底部时其厚度对地表峰值加速度影响，本次选取了软弱层埋深影响分析时所采用的软弱层顶板埋深 0 m、4 m、24 m、48 m 处的剖面作为 4 个新的基本计算剖面。软弱层在特定位置下，其厚度由 2 m、4 m、6 m 依次增加到 20 m，其余土层作相应调整，场地的覆盖层厚度从 50 m 逐渐增加到 68 m，各构造了 10 个新的剖面，然后分别输入调整后的 Taft（1952N21E）、Kobe（1995EW）和 E1-Centro（1940NS）波作为输入地震动，对 120 个工况进行土层地震反应分析。

3.1 软表层厚度影响

场地地表峰值加速度 A_{\max} 及土层放大系数 k 随软表层厚度变化情况如图 3 所示，从图中可以看出，当软弱层位于剖面表面时（埋深 0 m 处）：（1）对于给定输入地震动，当软表层厚度小于 6 m 时， A_{\max} 随着软表层厚度的增加有增大的趋势；当厚度超过 6 m 时， A_{\max} 随着软表层厚度的增加而减小；当厚度大于 10 m 时， A_{\max} 趋于稳定，受厚度的影响有限。（2）软表层厚度大于 6 m 时，不同

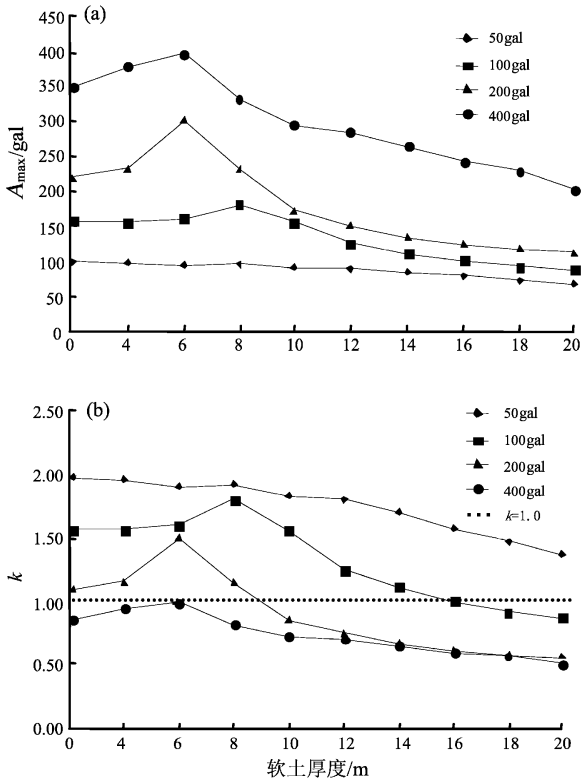


图 3 软表层厚度对场地地表峰值加速度 A_{\max} (a) 及放大系数 k (b) 的影响
Fig. 3 Effect of thickness of soft layer in the profile surface on acceleration peak A_{\max} (a) and amplification factor k (b)

地震动强度的 A_{\max} 及 k 值之间的差别随着软表层厚度增加呈逐渐减小的趋势。(3) 当软表层厚度大于 12 m 时, 输入地震动为 200 gal、400 gal 的 k 值基本一致, 表明软表层超过一定厚度, 输入峰值超过一定限值时, 土层放大系数 k 值基本上不受输入峰值的影响。(4) 当基岩输入地震动为 50 gal 时, 软表层厚度变化对场地地表峰值加速度 A_{\max} 的影响较小。

3.2 顶部软弱层厚度影响

当软弱层位于剖面顶部时 (埋深 4 m 处), 从图 4 可以看出场地地表峰值加速度 A_{\max} 及放大系数 k 随厚度变化规律与软表层的结果类似: (1) 在同等输入地震动条件下, A_{\max} 及 k 值随着软弱层厚度的增加而减小; 当顶部软弱层厚度大于 10 m 时, A_{\max} 趋于稳定, 受厚度的影响有限。(2) 在同等软弱层厚度条件下, 输入的地震动峰值越大 A_{\max} 值越大, 放大系数 k 值却越小, 且不同地震动强度的 A_{\max} 及 k 值的差别随着软弱层厚度的增加均变小。

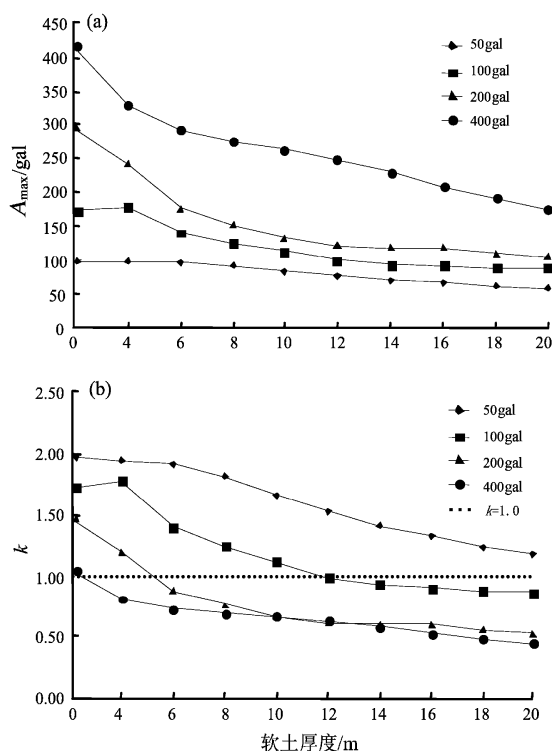


图4 顶部软弱层厚度对场地地表峰值加速度 A_{\max} (a) 及放大系数 k (b) 的影响

Fig. 4 Effect of thickness of soft layer on the top of the profile on acceleration peak A_{\max} (a) and amplification factor k (b)

3.3 中部软弱层厚度影响

当软弱层位于剖面中部时 (埋深 24 m 处), 从图 5 可以看出: (1) 同等的输入地震动条件下, A_{\max} 及 k 值随着软弱层厚度的增加而减小; (2) 当软弱层的厚度大于 6 m、输入地震动小于 200 gal 时, A_{\max} 趋于稳定, 受软弱层厚度的影响减小; (3) 土层放大系数 k 均小于 1.0, 即表示中部软弱层对场地起到较好的减震作用。

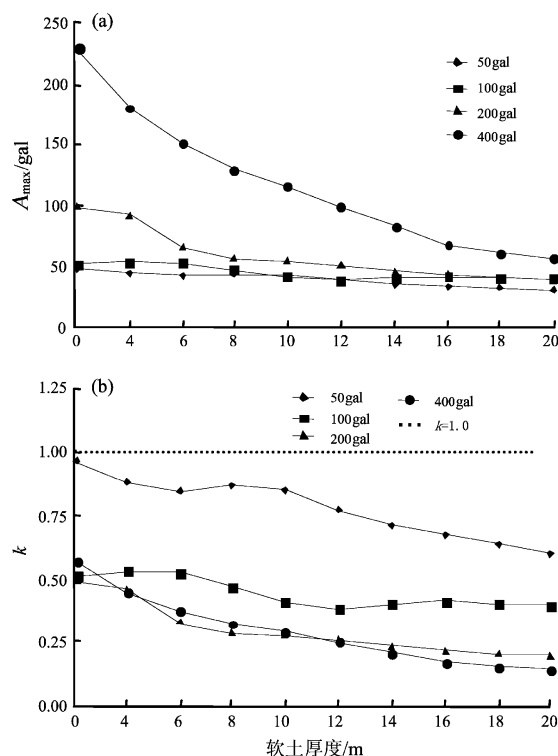


图5 中部软弱层厚度对场地地表峰值加速度 A_{\max} (a) 及放大系数 k (b) 的影响

Fig. 5 Effect of thickness of soft layer in the middle of the profile on acceleration peak A_{\max} (a) and amplification factor k (b)

3.4 底部软弱层厚度影响

当软弱层位于剖面底部时 (埋深 48 m 处, 基岩顶面), 从图 6 可以看出: (1) 当软弱层厚度大于 6 m 时, 地表加速度峰值 A_{\max} 开始趋于稳定, 受软弱层厚度的影响较小; (2) 土层的放大系数 k 均小于 1.0, 且多在 0.1 ~ 0.5 范围内, 表明底部软弱层的隔震作用效果明显, k 值主要与输入地震动峰值有关, 软弱层厚度的影响有限。输入地震动越大, k 值越小, 但当输入峰值超过 200 gal 时, k 值维持在 0.1 ~ 0.2 之间, 受输入基岩峰值的影响有限。

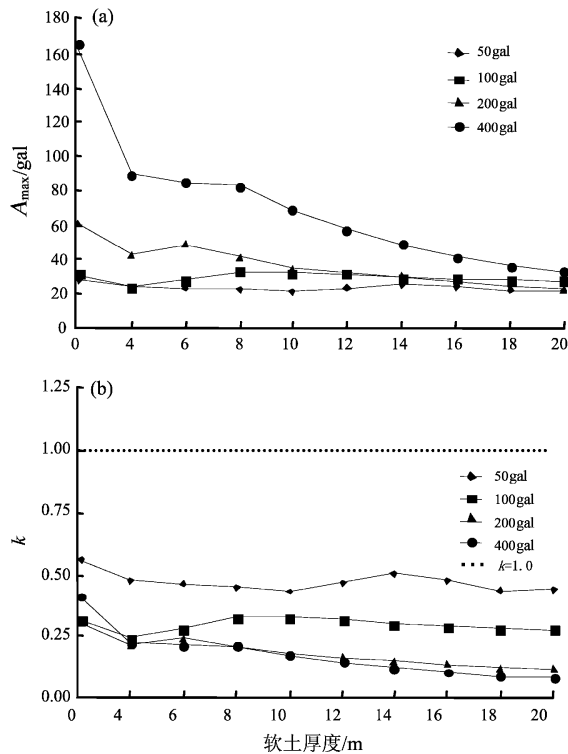


图6 底部软弱层厚度对场地地表峰值加速度 A_{\max} (a) 及放大系数 k (b) 的影响

Fig. 6 Effect of thickness of soft layer on the bottom of the profile on acceleration peak A_{\max} (a) and amplification factor k (b)

4 结论

笔者以江淮地区某软土场地为原型,分析了软弱层对场地地表加速度峰值的影响,得出以下结论:

(1) 对于给定的软弱层埋深和厚度,随着输入基岩地震动峰值的增大,地表加速度峰值 A_{\max} 增大,基岩加速度峰值放大系数 k 减小。

(2) 对于给定的输入地震动峰值,软弱层厚度越大,埋深越深,地表峰值加速度 A_{\max} 和放大系数 k 越小。但当软弱层超过一定厚度,埋深超过一定深度时, A_{\max} 及 k 值趋于稳定,基本不再受软弱层的影响。

(3) 对于给定的软弱层厚度,软表层对基岩加速度峰值的放大效应要稍弱于剖面顶部的软弱层。

(4) 土层放大系数 k 、临界深度 D ($k=1.0$ 时软弱层埋深) 与软弱层的位置、厚度、输入基岩地震动大小及覆盖土层厚度等因素有关。

(5) 由于软土的非线性,深厚的软弱层具有显著的减震作用,其厚度越大,埋深越深,输入地震动强度越高,减震的效果越明显。

参考文献:

- 薄景山,李秀领,李山有. 2003. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程,19(2):11-15.
- 董娣,周锡元,闫维明,等. 2006. 地震动不确定性及其影响因素的初步分析[J]. 地震研究,29(2):167-175.
- 黄雨,叶为民,唐益群,等. 2005. 上海软土地震反应特征分析[J]. 地下空间与工程学报,1(5):773-778.
- 黄玉龙,郭迅,袁一凡,等. 2000. 软泥夹层对香港软土地震反应的影响[J]. 自然灾害学报,9(1):109-116.
- 李小军,彭青,刘文忠. 2001. 设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J]. 世界地震工程,17(4):34-41.
- 刘峥,沈建文,石树中,等. 2009. 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),37(5):607-611.
- 吕悦军,唐荣余,彭艳菊. 2004. 烟台海岸软土地震特征及对地震动参数的影响[J]. 中国地震,20(4):323-329.
- 齐文浩,薄景山. 2007. 土层地震反应等效线性化方法综述[J]. 世界地震工程,23(4):221-226.
- 袁丽侠. 2003. 场地土对地震波的放大效应[J]. 世界地震工程,19(1):113-120.
- 袁晓铭,孙锐,孙静,等. 2000. 常规土类动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动,20(4):133-138.

Effect of Soft Soil Layer on Ground Motion Peak

CAO Jun-feng, TONG Yuan-lin, LI Guang, FENG Wei-dong, MENG Fan-yue,

Zhao Peng, Dong Shuang-lin

(*Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, Anhui, China*)

Abstract

Basing on a soft site in Jianghuai region, we constructed several analyze models of site soil seismic response. Then we selected three earthquake records of Taft (1952N21E), Kobe (1995EW) and E1-Centro (1940NS) as the input waves, and analyzed the effect of the buried depth and the thickness of soft soil layer on ground peak acceleration in frequency domain through one-dimension equivalent linear fluctuation method. The results showed that for the given input ground motion, the ground acceleration peak and soil amplification factors decreased gradually with the increase of thickness or buried depth of soft site. When the thickness or buried depth of soft site exceeded a certain value, the soft site began to show vibration reduction effect, the deeper and the thicker of the soft layer, the higher intensity of input ground motion, the vibration reduction effect is more obvious.

Key words: soft soil layer; buried depth; strong motion; amplification coefficient; acceleration peak