

周大鹏, 姜 慧, 吴 彬. 填海场地软弱夹层的地震响应特征分析[J]. 华南地震, 2017, 37 (2):48-52. [ZHOU Dapeng, JIANG Hui, WU Bin. Seismic Response Characteristics Analysis of Weak Interlayer in Reclamation Site[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2):48-52.]

填海场地软弱夹层的地震响应特征分析

周大鹏^{1,2,3,4}, 姜 慧^{1,2,3}, 吴 彬^{1,2,3}

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070;
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070; 4. 防灾科技学院, 河北 廊坊 065201)

摘要: 基于深圳市前海自贸区填海场地某一典型的含软弱淤泥夹层钻孔剖面, 对填海场地中软弱夹层的厚度和埋深对地面运动特性的影响进行分析。将原软弱夹层按 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m 厚度, 0 m(地表)、5 m、10 m、15 m、20 m、30 m、45 m(层底) 埋深, 构造出 35 个土层模型。利用土层一维等效线性化分析方法对上述 35 个土层模型进行不同超越概率地震动输入下的地震反应分析, 结果表明: 当输入地震动一定时, 随着软弱夹层埋深的增加, 地表加速度峰值放大倍数 k 逐渐减小, 埋深超过一定深度后, k 值小于 1; 随着软弱夹层的厚度增大, 加速度峰值放大倍数 k 先增大后减小; 随着输入地震动的增大, 各工况下地震地表加速度峰值放大倍数 k 相应都减小, 地表加速度峰值减小明显。

关键词: 填海场地; 软弱夹层; 等效线性化方法; 地表加速度峰值

中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 02-0048-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.008

Seismic Response Characteristics Analysis of Weak Interlayer in Reclamation Site

ZHOU Dapeng^{1,2,3,4}, JIANG Hui^{1,2,3}, WU Bin^{1,2,3}

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China;
3. Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Projects, Guangzhou 510070, China; 4. Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China)

Abstract: Based on the profile of a typical soft clay interlayer in the reclamation area of Qianhai Free Trade Zone in Shenzhen, the influence of the thickness and depth of the weak interlayer on the ground motion characteristics is analyzed. 35 soil layers were constructed according to the thickness and depth of the weak

收稿日期: 2017-02-23

基金项目: 深圳市填海场地地震响应特性分析(项目编号 XH14039Y)

作者简介: 周大鹏 (1990 -), 男, 在读硕士, 研究方向: 岩土工程与结构抗震。

E-mail: 15932629739@163.com.

通信作者: 姜 慧 (1964 -), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 地震工程与结构抗震。

E-mail: jianghui@cea-igp.ac.cn.

interlayer, where the thickness is divided into 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, and the buried depth is divided into 0 m (surface), 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 45 m (bottom). Based on seismic response analysis of the above 35 soil model with different transcendental probability ground motion using soil one-dimensional equivalent linearization method, the results show that when the input ground motion is constant, with the increase of the depth of the weak interlayer, the ground acceleration peak magnification k decreases gradually, and when the buried depth exceeds a certain depth, the k value is less than 1; with the increase of the thickness of the weak interlayer, the peak acceleration magnification k increased significantly and then decreases; with the increase of input ground motion, the magnification k decreases in each case, and the peak value of ground acceleration decreases obviously.

Keywords: Reclamation site; Weak interlayer; Equivalent linearization method; Ground peak acceleration

0 引言

历史上多次远场大震给人类的生命财产带来了巨大的损失,如1985年墨西哥7.8级地震,400 km以远的墨西哥城,15层以上高层建筑普遍发生严重破坏,研究表明:湖相沉积软土层的长周期地震效应,是导致墨西哥城巨大震害的主要原因。如今在我国沿海地区,大量含淤泥软土层填海场地上建设有很多高层建筑,这些高层建筑在未来的地震中是否安全,填海场地是否会产生长周期地震效应值得深入研究。

理论研究和强震观测结果都表明,土体中软弱夹层的存在对地表地震动参数有显著的影响。黄玉龙等对香港地区软土夹层的场地地震响应进行了研究,发现随着软土层埋深的增加,地表加速度反应谱由单峰变为双峰,且向长周期方向显著增大^[1]; Kanyen.R.E.对不同岩土层不同的震源深度随震中距离变化的水平烈度作了深入研究,表明岩土土层越“软”,其水平烈度越高^[2];周锡元曾指出软土层对谱形状和加速度峰值影响都很大,同时又能起到隔震作用^[3];薄景山等用土层一维等效线性化波动方法,得出在不同软弱夹层埋深、厚度,相同地震动输入的条件下,反应谱的特征周期随覆盖层厚度的增大而增大^[4];此外,对含软土夹层场地的地震动特性还有不少学者做过研究^[5-8]。

本文以深圳市前海地区填海场地为例,通过调整场地中的软弱淤泥夹层的厚度和埋深,研究不同厚度和埋深软弱夹层的填海场地对地表加速度的影响,为沿海地区含软弱夹层填海场地上的高层建筑抗震设计提供参考依据。

1 方法选取和场地模型构建

1.1 方法选取

场地土层地震反应分析的方法主要有频域等

效线性化方法和时域非线性方法^[9]。等效线性化方法,是将土体的实际应力-应变关系用等效剪切模量和等效粘性阻尼比表示,通过反复迭代进行多次线性计算,使等效参数与有效应力水平相匹配,而获得近似的非线性解答。主要是将土层的非线性效应问题等效为执行一系列的线性分析,因此等效线性方法无法进行真非线性分析;而非线性方法理论上可以用于分析在时域内土层的实际非线性反应,但是由于其土动力本构关系和数值积分方法较为复杂,并且场地参数输入繁杂,一般人员很难掌握,所以实际应用较少。等效线性化方法虽然有诸多不足,但它是实际土动力实验归纳的结果,物理力学参数简单易懂,并且积累了大量的工程经验,并考虑到与实际工程应用中的抗震规范的联系,因此本文仍选用此方法作为场地反应的计算方法。

1.2 场地模型构建

表1给出了深圳市前海自贸区填海场地某含软弱夹层场地的钻孔资料,可见其在深度8.2~12.8范围内有4.6 m厚的软弱淤泥夹层。计算时,首先将该软土层用其相邻上下两层土各占一半置换,变为不含软弱夹层的正常土层,总厚度不变。然后将原软弱夹层按2 m、4 m、6 m、8 m、10 m重新构造5个不同的厚度,按0 m(软弱层位于表层)、5 m、10 m、15 m、20 m、30 m、45 m(软弱层位于底层)构造7个不同的埋深,插入到不含软弱夹层的基本土层的相应深度处,共构造35个含不同厚度和埋深软弱夹层的土层模型。土层非线性动力参数是通过现场取得典型土样进行动三轴实验得到的。

2 模型场地的地震动影响分析

本节包括2个方面的内容,首先是基岩输入

地震动的选取，然后是模型场地对地表地震动峰值的影响分析。

表 1 典型钻孔剖面资料

Table 1 Profile data of typical drilling

土层编号	土类别	厚度/m	埋深/m	密度/ kgom ⁻³	剪切波速/ mos ⁻¹
1	回填土	8.2	8.2	1 750	182
2	淤泥	4.6	12.8	1 660	116
3	粉质粘土	3.7	16.5	1 870	185
4	中砂	2.4	18.9	1 960	226
5	粗砂	3.9	22.8	1 960	274
6	砂质粘土	6.8	29.6	1 820	256
7	全风化岩	7.9	37.5	1 850	326
8	强风化岩	7.5	45	1 870	439
9	中风化岩			2 100	917

为了方便比较，每个地震级别下选取 4 条输入波(1 条人工波和 3 条天然波)，对每个不同厚度和埋深钻孔土层模型的地表加速度峰值计算结果，按常遇地震(50 年超越概率 63%)、设防地震(50 年超越概率 10%) 和罕遇地震(50 年超越概率 2%)，计算得出的 4 条地表水平向加速度时程峰值的平均值，并与相应 4 条基岩加速度峰值的平均值作比值，得到每个土层模型在不同地震动输入条件下的地表加速度峰值放大倍数 k 。

2.1 基岩输入地震动选取

本文选用人工波和天然波的组合作为土层反应的地震动输入。人工波的选用，按场地 50a63%、50a10%、50a2% 三个超越概率人工合成基岩地震动各一条，其加速度峰值分别为 20.2 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 、91.9 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 和 170.4 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ ，加速度反应谱如图 1 所示；天然波的选用，考虑研究区域所受潜在地震威胁主要来自担杆列岛，震级上限 $M_w=7.5$ ，距离场地 50 km，并适当考虑远震的影响，从美国太平洋地震工程研究中心 PEER 选取 3 条实测基岩地震动，记录参数见表 2，根据本区基岩地震动概率危险性分析的结果，将每条实测地震动时程按三个超越概率下基岩加速度峰值分别为 20.2 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 、91.9 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 和 170.4 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 调整峰值，得到 9 条天然地震波时程，人工波加天然波共 12 条地震波做为输入地震动时程，各条人工波和未调幅天然波的加速度反应谱以及未调幅天然波的加速度时程如图 1、图 2 所示。

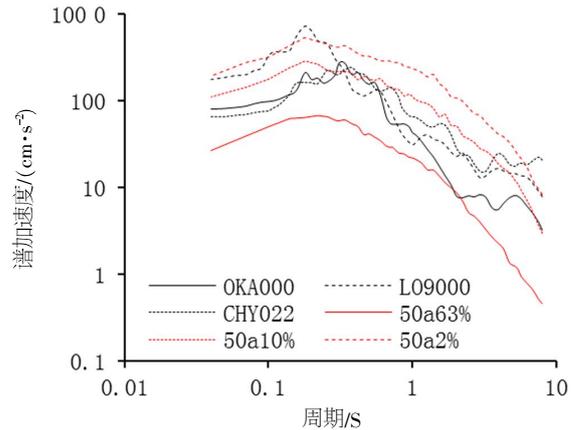


图 1 天然波和人工波的加速度反应谱

Fig.1 The acceleration response spectra of natural and artificial wave

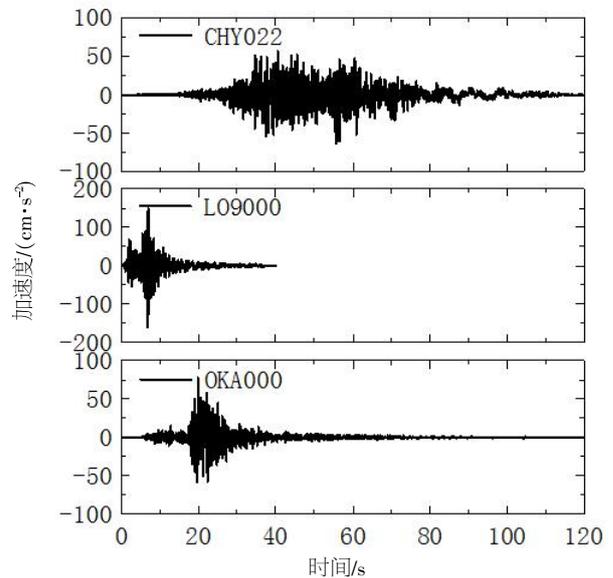


图 2 天然波的加速度时程曲线

Fig.2 The acceleration time history of natural waves

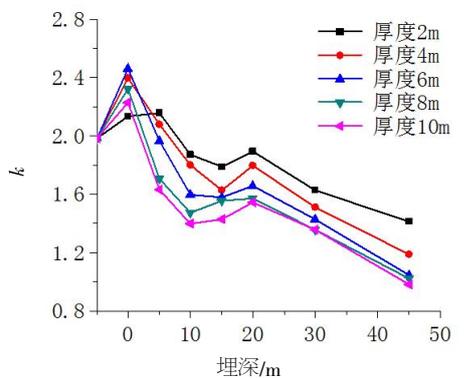
编号	地震事件	震级/ M_w	震中距/ km	$V_s30/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	PGA/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$
OKA000	Kobe 1995-01-16	6.9	86.9	609	77.2
L09000	Northridge 1994-01-17	6.7	24.9	671	161.9
CHY022	Chi-Chi 1999-09-21	7.6	63.2	564	62.4

2.2 模型场地对地表地震动的影响

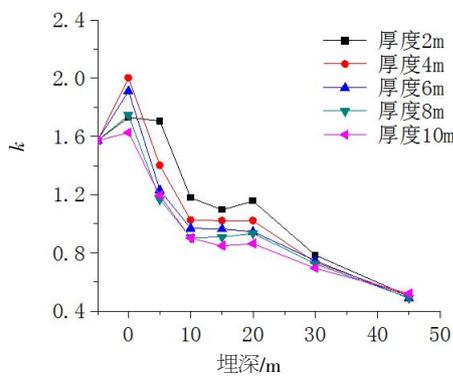
2.2.1 软弱夹层埋深对地表地震动的影响

图 3 为三个级别地震输入下，同一厚度的软弱夹层随着其埋深的增大，对地表加速度峰值放大倍数 k 的影响(其中 x 坐标轴-5 刻度对应的 k 值表示不含软弱夹层的基本土层模型计算结果)。可以看出:(1) 随着输入地震动的增强，放大倍数 k

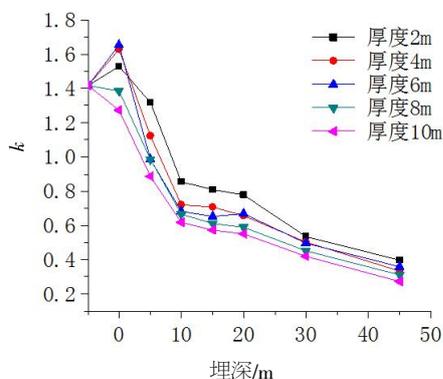
减小, 且当常遇地震输入时, 所有工况下的放大倍数都大于 1。(2) 在常遇地震和设防地震输入下, 各厚度的软弱夹层在埋深为 0 m (地表) 时, k 值均大于不含软弱夹层的基本土层, 说明软夹层位于地表时, 相对于不含软夹层土层对加速度峰值有放大作用。(3) 随着埋深的增加, 相同厚度软夹层的土层地表加速度峰值放大倍数逐渐减小, 深度越深减小的速率越小; 但各厚度下的 k 值均在埋深 20 m (中部) 处平稳中略有增大, 在实际场地地震动的设计中当有埋深 20 m 左右的软弱层时要引起重视, 不能简单地按照埋深越大, 加速度峰值线性减小来判断。



(a) 常遇地震



(b) 设防地震



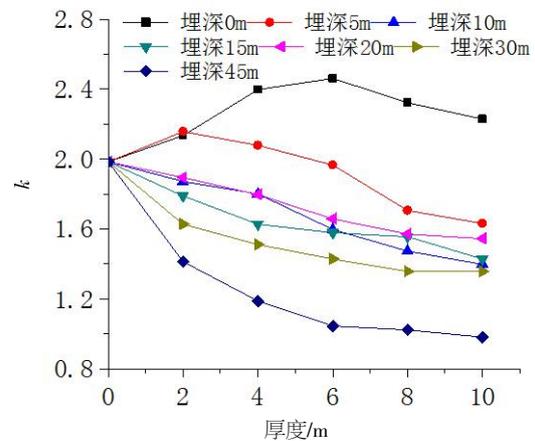
(c) 罕见地震

图 3 放大倍数 k 随软弱夹层埋深的变化

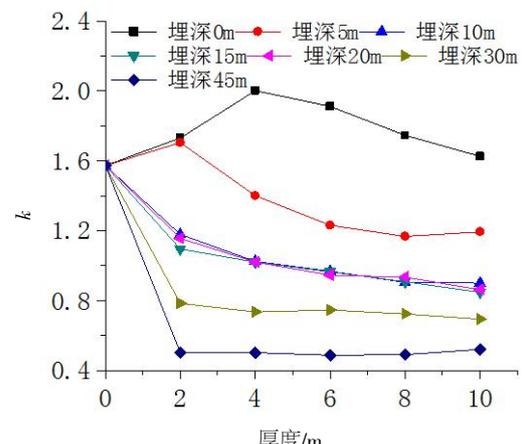
Fig.3 The magnification k varies with the depth of the soft interlayer

2.2.2 软弱夹层厚度对地表地震动的影响

图 4 为三个级别地震输入下, 同一埋深的软弱夹层随着其厚度的增大, 对地表加速度峰值放大倍数 k 的影响(其中 x 坐标轴 0 刻度对应的 k 值表示不含软弱夹层的基本土层的计算结果)。可以看出:(1) 地表含软弱层的土层, k 值均比不含软弱层的基本土层大, 且随着软弱层厚度的增加, k 值随之增大, 厚度为 6 m 时到达峰值, 随后逐渐减小, 说明当软弱层在地表时可能会放大地震动, 且软弱层的厚度不同时对地震动的放大也不同, 应该引起足够的重视。(2) 软土层在地表以下时, 除在多遇地震输入下埋深 5 m 厚度 0~6 m 的土层和设防地震输入下埋深 5 m 厚度 0~2 m 的土层 k 值大于无软弱夹层的基本土层, 其余埋深和厚度的土层均小于基本土层, 且随着厚度的增大, 放大倍数逐渐减小, 减小速率逐渐变缓。(3) 设防地震和罕遇地震下埋深超过 10 m 时, 软夹层厚度的增加对地表加速度峰值的影响已经不明显, 且 k 值远小于不含软弱夹层的基本土层, 说明当软弱夹层位于土层中部和底部时, 对高频地震动吸收效应明显。



(a) 常遇地震



(b) 设防地震

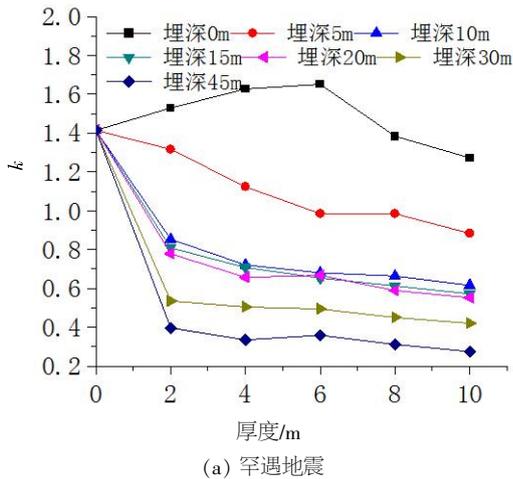


图4 放大倍数 k 随软夹层厚度的变化

Fig.4 The magnification k varies with the thickness of the soft interlayer

3 结语

本文基于深圳市前海自贸区的实际工程场地背景,分析了存在的软弱夹层填海场地对地表加速度峰值的影响,得出以下结论:

(1) 软弱层位于地表时,相对于不含软弱层的基本土层,对加速度峰值有放大作用,且随着地表软弱层厚度的增大,放大作用逐渐增大,且在厚度为 6 m 左右时放大倍数达到最大,随后逐渐减小。

(2) 软弱夹层位于土层中上部位(如 5 m)时,除了在常遇地震输入下软夹层厚度小于 6 m 和设防地震输入下软夹层厚度小于 2 m 的土层 k 值大于无软夹层的情况,其余各埋深和厚度的土层均小于基本土层, k 值大于无软夹层的情况,软夹层对高频地震动吸收效应明显。

(3) 软弱夹层位于土层中部(如 10 m、15 m、20 m)时,其厚度对于放大倍数 k 的影响不明显。

(4) 软弱夹层位于土层下部(如 30 m、45 m)时, k 值远小于不含软弱夹层的情况,高频地震动被吸收,地表加速度峰值明显减小。

总体来说,对于本文研究的填海场地软弱夹层土层地震动特征,当软弱夹层位于地表时对地震动呈放大作用;位于土层上部时在小震下放大地震动,在中大震下削弱地震动;位于土层中部和下部时呈减震作用,且此时随着软夹层厚度的变化,减震作用变化不明显。这与文献 [5]、[8]、[10]、[11]等的研究结果大致相同,表明不同地区含软弱夹层场地的地震动可能有相似的特征。

以上结论,对含软弱夹层填海场地设计地震动输入选取有一定参考意义,但受土层反应分析方法和土动力参数本构关系的局限,分析结果可能与真实情况有一定偏差,其合理性有待进一步检验。

参考文献:

- [1] 黄玉龙,郭迅,袁一凡. 软泥夹层对香港软土地地震反应的影响[J]. 自然灾害学报, 2000, 9 (1): 109-116.
- [2] Kayen.R.E. Accelerogram energy approach for prediction of earthquake induced ground liquefaction [D]. Berkeley: University of California, 1993.
- [3] 周锡元. 土质条件对建筑物所受地震荷载的影响 [M] // 中国地震局工程力学研究所地震工程研究报告集. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] 薄景山,李秀领,李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J].世界地震工程, 2003, 19 (2): 11- 15.
- [5] 荣棉水,李小军,卢 滔. 对含厚软表层海域工程场地设计地震动参数确定的一点建议[J].地震学报, 2013, 35 (2): 262-271.
- [6] 姜 慧,余演波,王立新. 澳门地区建筑物设计地震动参数研究[J].华南地震, 2008, 28 (2): 28-35.
- [7] 姜 慧,黄剑涛,卢帮华. 基于地震作用和场地影响确定广东省设计地震动参数[J].震灾防御技术, 2010, 5 (4): 398-407.
- [8] 李 恒,张静波,吴建超. 软夹层和硬夹层对地表地震动特性的影响[J].地震工程学报, 2014, 36 (3): 441-445.
- [9] 齐文浩,薄景山,张忠利. 土层地震反应分析的研究现状[J].世界地震工程, 2010 (26): 368-372.
- [10] 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): 192-196.
- [11] 陈国兴,陈继华. 软弱土层的厚度及埋深对深厚软弱场地地震效应的影响[J].世界地震工程, 2004, 20 (3): 66-73.