

沿海软土地区浅部土层地震运动特征研究

高彦斌, 晁浩

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:沿海软土地区的深厚覆盖层会明显放大地震动,对工程建设产生不利影响。基于一维水平土层地震反应的频域分析方法,采用等效线性化动力计算模型,输入不同的地震动,分析7度设防地震下不同场地条件下的浅部场地地震运动特征。研究表明:浅部软土厚度以及地震动频谱差异会明显影响浅部土层(70 m以内)的最大加速度、最大剪应力、最大剪应变和相对位移。相对位移随深度的变化规律不符合规范建议的余弦函数的特征,余弦曲线明显低估较浅位置的位移变化率(剪应变),而高估较深位置的位移变化率(剪应变)。提出了一个拟合关系式来预估7度设防地震下沿海软土地区70 m以内浅部土层的相对位移,该拟合关系具有一定的局限性,但可对沿海地区地下工程地震响应分析提供参考。

关键词:软土;地震响应;地下工程;相对位移

中图分类号:TU435

文献标识码:A

Research on seismic motion in shallow depth in coastal soft soil area

GAO Yanbin, CHAO Hao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The deep overburden in coastal soft soil areas will magnify ground motion significantly, which will have adverse effects on engineering construction. Based on the frequency domain analysis method of seismic response in one-dimensional horizontal soil layer, inputting different seismic waves, the equivalent linearized dynamic calculation model is used to analyze the shallow site seismic motion characteristics of different site conditions under 7-degree seismic fortification. The calculation results show that the maximum acceleration, the maximum shear stress, the maximum shear strain and relative displacement of the shallow soil layer within 70 m can be significantly affected by the difference of shallow soil layer thickness or seismic wave spectrum. The variation of relative displacement with depth does not conform to the characteristics of cosine function recommended by the code. The cosine curve apparently underestimates the rate of change in displacement (shear strain) at the shallower position and overestimates the rate of change in displacement (shear strain) at the deeper position. In this paper, a fitting relation is proposed to estimate the relative displacement of shallow soil layers within 70 m in coastal soft soil areas under 7-degree seismic fortification. This fitting relation has certain limitations, but can provide reference for seismic response analysis of underground engineering in coastal areas.

Key words: soft soil; earthquake response; underground engineering; relative displacement

0 引言

我国沿海地区经过近代海侵旋回,浅部普遍分布淤泥质软土层,且厚度变化较大。黄润秋等^[1]研究表明,软弱土层波速不大于上下围岩的30%时,就会产生相当明显的地震动放大作用,夹层放大的强度主要与

收稿日期:2023-04-27; 修回日期:2023-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41972273)

作者简介:高彦斌(1973—),男,副教授,博士,主要从事软土力学特性与软土工程研究。E-mail:yanbin_gao@tongji.edu.cn

其波速有关。陈国兴等^[2]提出浅层软弱土层会明显放大地表加速度峰值,但软弱表层土足够厚,深度足够深反而会起到减震的作用。黄雨等^[3]提出软土地表对于地表峰值加速度具有明显的放大作用,越接近地表,土层的加速度放大系数也越大;场地对地震加速度的频谱有选择作用,使低频成分放大,高频成分降低,长周期成分突出。以上研究表明,沿海城市的软弱土层覆盖层会明显放大地震动,对工程建设产生不利影响。但这些研究大多关注地面运动的响应特征,如地表加速度峰值和反应谱,为地上结构抗震提供依据。

随着城市的快速发展,地下空间规模越来越大,地下轨道交通、地下管线系统越来越多,地下结构抗震研究也越来越重要。当前地下结构抗震设计中,通常采用反应位移法进行计算分析。在反应位移分析法中,地下结构埋深处土层的地震响应(如加速度、应力应变、相对位移等)是必要的计算条件^[4],土层的相对变形及其在结构周围施加的剪应力是引起结构内力变化的主要原因^[5]。

国家标准 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[6]及速度反应谱法^[7]都假设地层相对位移可用余弦函数描述,随着深度的增大而减小,在基准面处的相对位移为零。这些理论公式来源于均质地层的地震响应分析,而沿海软土地区浅部土层具有厚度不一的软弱土层,与深部土层的波速差别较大,这些理论公式可靠性需要深入研究讨论。另外,由于沿海地区覆盖层厚度较大,设计地震作用基准面深度 H 的确定也是值得关注的一个问题。根据 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》条文 4.2.5 规定应按地面至剪切波速大于 500 m/s 且其下卧各岩土层的剪切波速均不小于 500 m/s 的土层顶面的距离确定,以上海市土层为例,根据此标准确定的 H 为 150 m,而上海市标准 DG/TJ 08-2064—2022《地下铁道结构抗震设计标准》^[8]中推荐 H 的取值为 70 m。袁勇等^[9]比较了上海市 DG/TJ 08-2064—2022《地下铁道结构抗震设计标准》规范 70 m 取值与根据 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》确定的 150 m 取值下地铁车站结构的横向地震响应,发现当采用底部边界黏弹性透射边界时,不同深度模型响应基本一致。

已有学者研究了软土层对地下结构地震响应的影响。王国波等^[10]建立了上海软土的三维数值模型,研究表明土体有滤波作用并且软土并不总是放大地震效应,而与地震动及土体本身的特性有关。朱言灯^[11]利用 MSC.Marc 建立了土-地下结构动力作用的有限元模型,通过改变软弱土层的位置,改变地铁站埋置的深度,探讨了不同场地条件下土层与地下结构的地震反应,经过对比分析,证明地下结构埋深越浅,地下结构与土层的地震反应越强烈;强震作用下软土夹层具有一定的隔震效果。程学磊等^[12]通过振动台试验,研究表明模型地基中地震动向上传播过程中表现出高频滤波、低频放大作用,其中强震作用下地基失效进而表现为减、隔震作用。吴晔等^[13]采用基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法进行计算,研究软弱土层位置对地下结构地震反应的影响,结果表明:软弱夹层的存在对地下结构地震响应有较大影响,尤其是当软弱夹层位于地下结构中上部并且具有一定厚度时,地下结构的地震反应较常规均匀场地条件中的反应强烈。冯忠居等^[14]利用 MIDAS/GTS 有限元分析软件研究强震作用下桩-土-断层非线性动力响应特性,研究表明相同土层对不同地震动加速度放大效果并不完全相同,且桩基所处地质条件不同对地震动作用下桩身加速度变化规律影响显著。张志明等^[15]采用振动台模型试验,研究表明地震动的频谱特性同时影响场地、框架式车站结构的加速度大小及其沿场地深度的分布,且低频成分丰富的地震动对场地及结构的加速度的放大效应更显著。但是这些研究多关注地下结构的响应,在建立有限元模型时往往采用均一化地层或仅采用标准地层去分析,对周围土层的地震响应特征关注较少。

本文将基于一维水平土层地震反应的频域分析方法,利用 Shake91 软件,采用等效线性化动力计算模型,以上海深厚覆盖土层的典型地质剖面为背景,构建不同浅部场地条件,开展浅部自由场的地震响应研究,并评价规范建议的地层相对位移计算公式。

1 自由场地地震反应分析方法

1.1 等效线性化方法

自 1969 年,Seed 和 Idriss 首次用等效线性化方法计算了水平场地的地震反应以来,等效线性化方法在工程中得到广泛应用。等效线性化方法中,土体在动力荷载下的剪切模量和阻尼比由等效剪应变幅值确定,而土体在确定动力荷载下的等效剪应变幅值受剪切模量和阻尼比的影响,故需采用迭代法确定等效剪应变幅值。本文采用 Shake91 这一常用的等效线性方法计算程序,剪切模量比以及阻尼的剪应变土体本构采用 Idriss 模型^[16],土体本构曲线如图 1 所示。

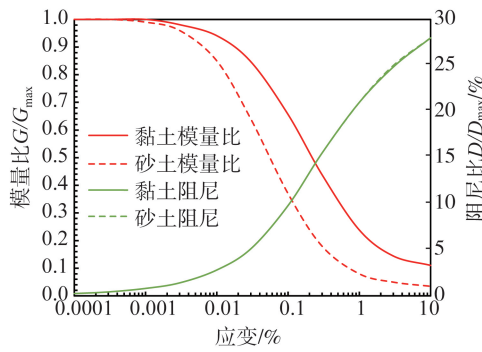


图 1 土体本构曲线

Fig. 1 Constitutive curves of soil

1.2 场地分类及地层参数

沿海地区浅部土层的地质条件大致可分为三类:第一类为典型滨海平原地层,这类场地经过海侵旋回,浅部存在约 20 m 厚度的海相沉积软弱土层;第二类为典型滨海平原地层,浅部淤泥质土层受近代河流侵蚀缺失,代替为陆相砂层;第三类为局部存在晚更新世深切古河道,导致沉积较厚的滨海相和海陆过渡相的超厚软土层。本文结合已有的研究^[17-18],采用上海深厚覆盖土层的典型地质剖面,深厚覆盖层总厚度约 280 m,浅部土层除表层填土、黏土层、砂层以外,有着深厚不等的淤泥质黏土层,深部土层为若干形成历史较久的砂层和黏土层。土层计算参数根据直至基岩的整个上海覆盖土层勘察资料和现行上海设计规范结合文献确定,具体土层及其参数见表 1。

表 1 上海典型地质剖面参数

Table 1 Typical geological profile parameters in Shanghai

土层编号	土层名称	顶板埋深/m	厚度 h/m	容重 $\rho/(kN/m^3)$	剪切波速 $v_s/(m/s)$
1	黏性土	0	3	19.00	100
2	淤泥质粉质黏土	3	7	17.50	130
3	淤泥质黏土	10	10	17.50	160
4	黏性土	20	5	18.20	190
5	黏性土	25	5	20.00	260
6	粉细砂	30	15	19.20	290
7	粉质黏土夹粉砂	45	30	19.00	320
8	细、中、粗砂	75	20	19.50	340
9	黏性土	95	15	20.00	400
10	含砾中、粗砂	110	30	20.20	420
11	黏土	140	30	20.40	440
12	含砾中、粗砂	170	60	20.60	500
13	黏土	230	30	20.80	510
14	中、粗砂	260	20	21.00	580
	基岩	280	无限	23.90	2000

表 1 地层为典型滨海平原相地层,软土厚度 T 约 20 m,用土层组合 A ($T=20$ m) 表示。在土层组合 A 的基础上,浅部 4 层土替换为砂质粉土,软土层厚度 T 为 0,命名为土层组合 B ($T=0$ m)。在土层组合 A 的基础上,替换深部 4~7 层土为淤泥质土,软土层厚度 T 为 50 m,定义为土层组合 C ($T=50$ m)。根据已有的研究^[19],这三类场地的浅部土层 70 m 内剪切波速随深度的变化曲线见图 2。

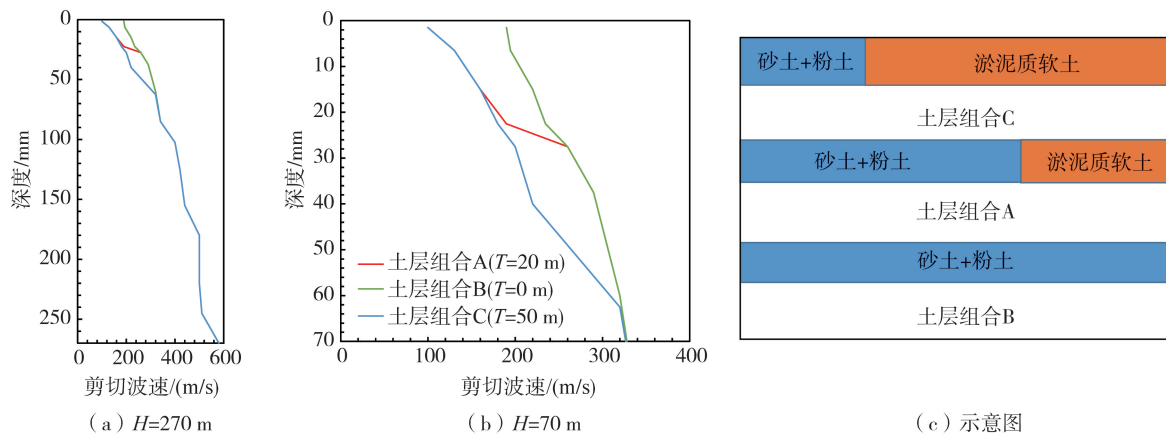


图2 深度-剪切波速曲线图及示意图

Fig. 2 Depth-shear wave velocity curves and schematic diagram

1.3 地震动的选取

选取了3个地震动:①美国加州 Imperial Valley 7.1级强震地震记录的 El Centro 地震动;②美国加州圣费南多 6.6级强震地震记录的 San Fernando 地震动;③我国四川汶川 8.0级强震地震记录的汶川地震动。这3种地震动时程曲线及傅里叶频谱分别如图3、图4所示。El Centro 地震动主频在 1.0~2.0 Hz, San Fernando 地震动主频在 1.0~3.0 Hz, 汶川地震动主频在 2.0~4.5 Hz, 高频占比较大。计算分析时基岩输入地震动按一定比例缩小, 标准是使土层组合 A ($T=20$ m) 的地表峰值加速度控制在 $0.10 g$ 。

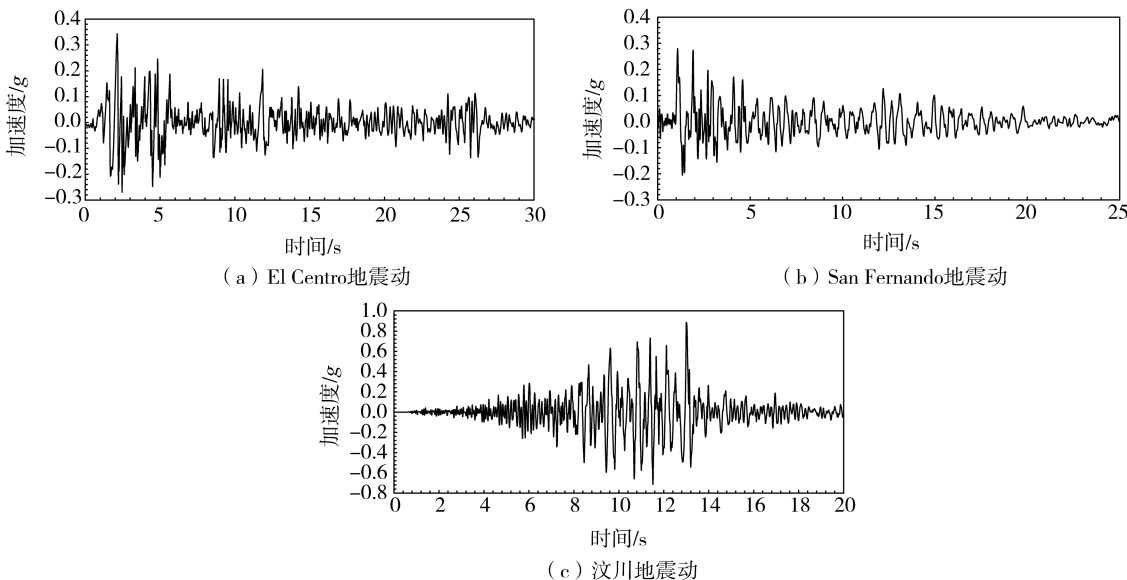


图3 地震动时程曲线

Fig. 3 Time history curves of ground motion

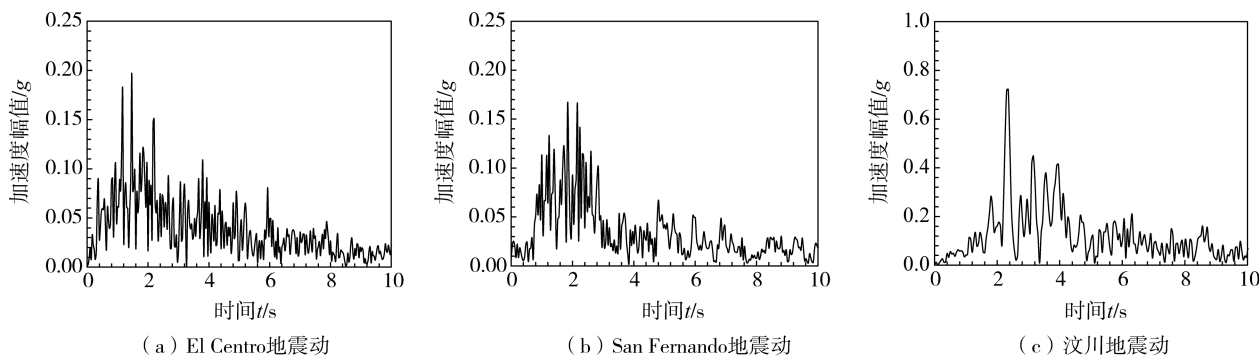


图4 地震动傅里叶频谱

Fig. 4 Fourier spectrum of ground motion

2 浅部土层地震运动特征

2.1 加速度分析

图5给出了3种地震动下土层的最大加速度 a 随深度的变化曲线。不同地震动下最大加速度的幅值 and 变化趋势基本一致。浅部70 m以内的放大效应明显,尤其是浅部30 m以内,地震加速度迅速增大。输入El Centro地震动、San Fernando地震动、汶川地震动下,地表最大加速度幅值最大的分别为土层组合A($T=20$ m)、土层组合B($T=0$ m)、土层组合C($T=50$ m)。场地的最大加速度幅值变化明显与软土厚度以及地震动振动特性有关。在主频较低的El Centro地震动和San Fernando地震动下,软土层的放大效应较为明显,但放大效应与软土的厚度无正相关关系。

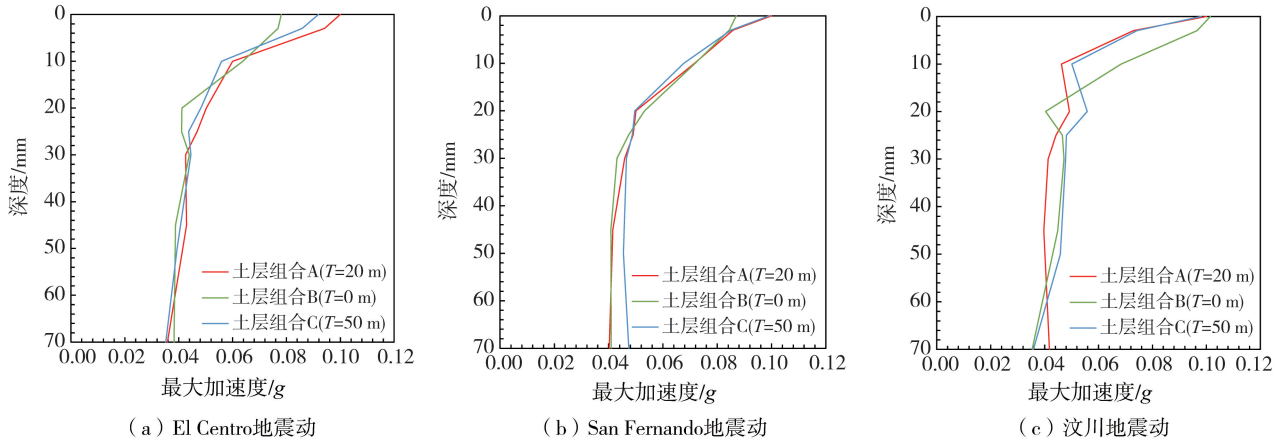


图5 最大加速度随深度变化曲线

Fig. 5 Variation curves of the maximum acceleration with depth

2.2 应力-应变分析

图6给出了最大剪应力 τ 随深度的变化曲线。总体来看,最大剪应力随着深度增大而逐渐增大。在低频El Centro和San Fernando地震动下,浅部土层变化对最大剪应力值的影响不大,呈现随深度缓慢增加的规律。在高频汶川地震动下,最大剪应力在浅部20 m左右出现小峰值,然后在70 m深度内变化较小;浅部软土层在一定程度上会降低最大剪应力幅值,可能是因为软土的刚度相对较小,剪应变较大而剪应力较小。

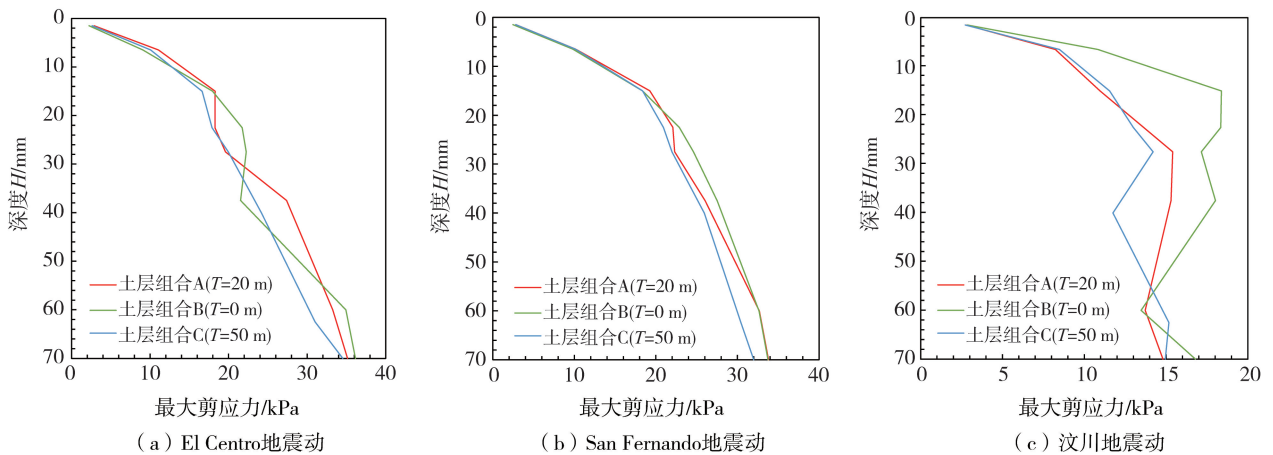


图6 最大剪应力随深度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of the maximum shear stress with depth

最大剪应变 γ 随深度的变化曲线如图7所示。3种地震动作用下,最大剪应变先是随着深度的增大而增大,达到峰值后随深度的增大而减小。El Centro地震动与San Fernando地震动的规律相近,土层组合A($T=20$ m)和C($T=50$ m)下,最大剪应变峰值在0.04%~0.05%之间,出现在埋深8~15 m之间;土层组合B($T=0$ m)下,最大剪应变峰值接近0.03%,出现在埋深13~22 m之间。另外,在软土层厚度最大的土层组合C($T=50$ m)下,最大剪应变 γ 较大且随深度的衰减程度较低。在高频汶川地震动的作用下,土体最大剪

应变 γ 随深度的变化规律有所不同,3种地层下峰值出现的深度较浅(在5~15 m之间),且随深度增大而衰减的程度较小而影响深度较大(达到60 m)。

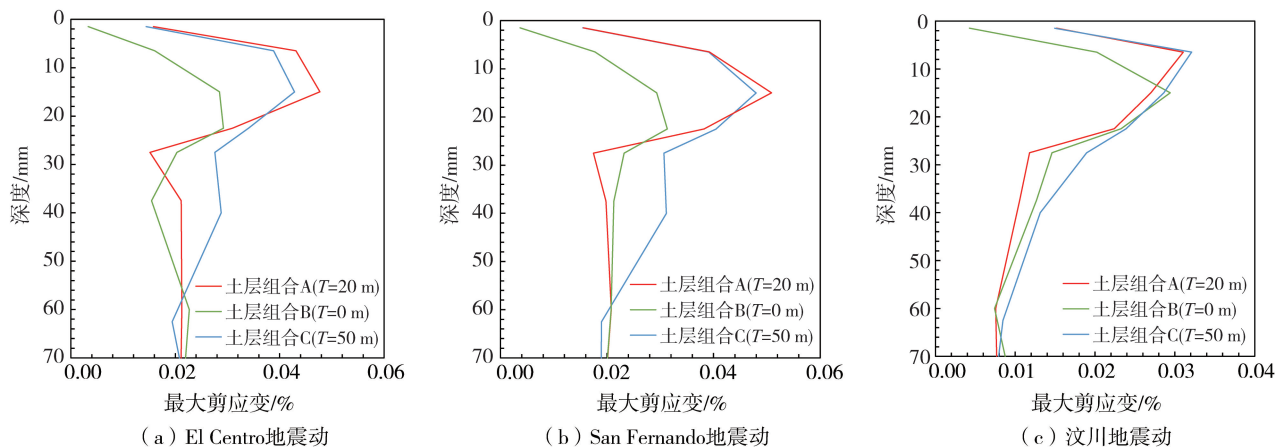


图7 最大剪应变随深度变化曲线

Fig. 7 Variation curves of the maximum shear strain with depth

由图7可知:

1) 低频地震动下的剪应力和剪应变略大一些。最大剪应力受浅部土层分布的影响较小,但剪应变受浅部地层分布影响较大。软土土层所在位置会有较大的最大剪应变,相比无软土同深度土层是其剪应变的约2倍。

2) 高频地震动下的剪应力和剪应变均要小一些。最大剪应变受浅部土层分布的影响较小,最大剪应力受浅部土层分布的影响较大。应是地震动的频率过高相比低频地震动同土层的自振频率差距较大而造成的动力响应剪应力和剪应变均要小一些。

2.3 相对位移分析

对于地下结构周围土层的相对位移,国家标准 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[6]中推荐的计算公式为

$$U_a(z) = \frac{1}{2} u_{\max} \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (1)$$

式中: z 为距离地面的埋深(m); $U_a(z)$ 为 z 埋深处最大相对位移(m); u_{\max} 为场地地表设计最大位移(m); H 为设计地震作用基准面深度(m)。

图8给出了 El Centro 地震动下的相对位移以及归一化相对位移,由于 El Centro 地震动及 San Fernando 地震动下的相对位移响应非常接近,因此仅给出 El Centro 地震动的结果,图中的归一化相对位移为 $\Delta u/\Delta u_{\max}$,可根据该归一化相对位移比较曲线变化趋势。在低频的地震动下,浅部土层的变化对相对位移随深度的变化规律略有影响。软土的存在导致相对位移曲线斜率增大(剪应变增大),相对位移随深度的变化率增大。以 $H=70$ m 处为基准,三类地质条件下的地表处最大相对位移 Δu_{\max} 分别为 0.011、0.009、0.010 m,计算结果与文献[20]计算结果相近。根据 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》条文 5.2.4 规定,7度设防地震下 E3 地震作用二类场地设计地震动峰值位移为 0.15 m,四类场地 7度设防地震下地震动峰值位移调整系数 $\Gamma_u=1.55$,根据式(1)规范公式计算得到的最大相对位移 $\Delta u_{\max} = u_{\max}/2 = u_{\max \parallel} \Gamma_u/2 = 0.116$ m,可以看出,按照 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》得到的相对位移较为保守,约为数值计算结果的 8 倍。

另外,根据图8(b)给出的归一化相对位移曲线可以看出,计算结果与式(1)给出的余弦函数具有一定的差别,余弦函数在较浅位置给出了较小的变化率,而在较深位置给出较大的变化率。规范中给出的位移随深度变化为余弦曲线,求导斜率即为剪应变其随深度的变化为正弦曲线,即浅部剪应变小,深部剪应变大,该规律在文献[5]北京某车站的表现良好,但根据图7剪应变随深度的变化曲线,由于上覆土层过厚为 280 m 远超过 20~30 m,仅浅部 15 m 以内符合规范规律,并且软土的存在导致软土部分剪应变过大,使得浅部剪应变小,深部剪应变大的规律完全不符合。根据归一相对位移曲线的变化趋势,可以使用玻尔兹曼函数进行拟合,如式(2)所示:

$$\frac{\Delta u}{\Delta u_{\max}} = 1 - \frac{1 + \alpha^{-n}}{1 + \left(\alpha \times \frac{z}{H}\right)^{-n}} \quad (2)$$

式中: α 和 n 均为函数参数,用来调整曲线趋势; z 为深度; H 为位移为 0 的深度。

图 8(b) 中给出了参数取值 $\alpha = 2.8$ 、 $n = 2$ 、 $H = 70$ m 时的拟合曲线,可以看出,该曲线大致可以反映现场的相对位移特征。

汶川地震动作用下,即高频地震动下,浅部土层的相对位移曲线发生了明显的变化。显著的相对位移仅出现在埋深较浅的位置,波长明显变小,导致在 70 m 深度范围内出现双向震动的情况(正负两个方向)。在 A($T=20$ m)、B($T=0$ m)、C($T=50$ m) 这三种地层组合下,浅部相对位移为 0 的位置分别出现在深度 12 m、41 m 和 26 m,地表最大相对位移 Δu_{\max} 分别为 0.002、0.006、0.005 m。可以看出,采用式(1)规范公式得到的相对位移与数值计算结果差别较大,不能反映场地浅部土层的位移特征,明显低估浅部土层的位移变化率(剪应变),而高估深部土层的位移变化率(剪应变)。

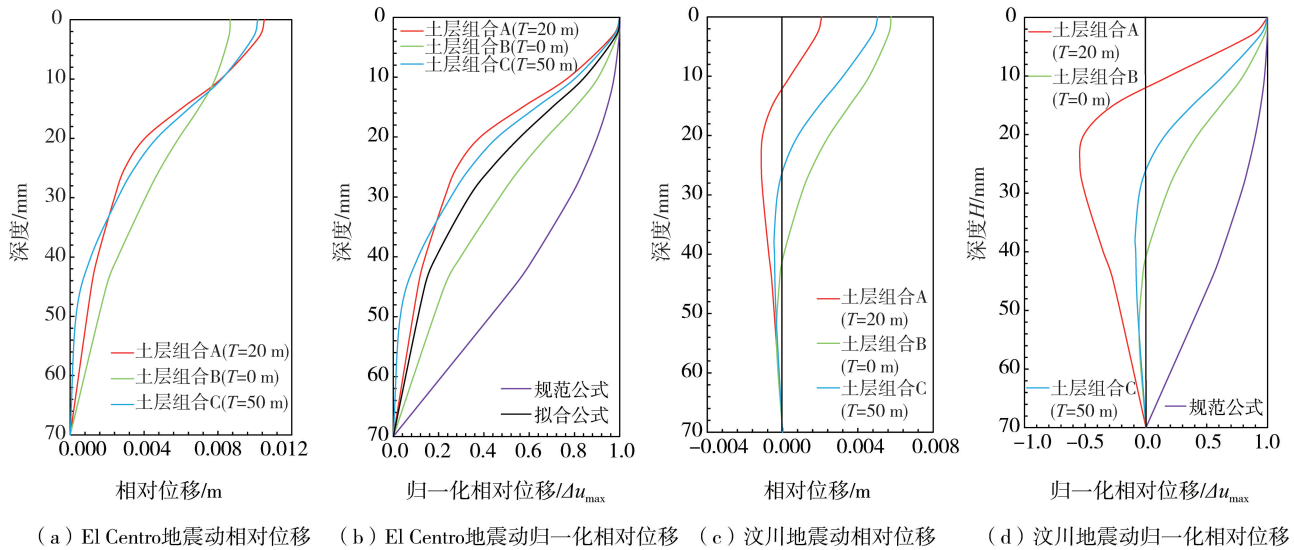


图 8 相对位移以及归一化相对位移曲线

Fig. 8 Relative displacements and normalized relative displacements curves

3 结论

本文基于一维水平土层地震反应的频域分析方法,采用等效线性化动力计算模型,以上海深厚覆盖土层的典型地质剖面为背景,分析 7 度设防地震下不同浅部土层组合的浅部自由场的地震响应特征,主要结论如下:

1) 深度 70 m 以内最大加速度的幅值和变化趋势受浅部土层组合以及地震动的影响不大,浅部 30 m 以内的放大效应明显,地震加速度随埋深减小而迅速增大。

2) 低频地震动下深度 70 m 以内的最大剪应力随深度的变化受浅部土层组合的影响较小,最大剪应力随着深度增大而逐渐增大。在高频地震动下,浅部软土层在一定程度上会降低最大剪应力幅值。

3) 低频地震动下最大剪应变的幅值和随深度的变化受土层的影响显著,浅部软土层会增大最大剪应变幅值。在高频地震动下,浅部土层组合的这种影响会弱一些,剪应变幅值也要小一些。

4) 土层组合对深度 70 m 以内的相对位移随深度的变化有一定的影响。以 $H = 70$ m 处为基准,低频地震动下三类地质条件下的地表处最大相对位移分别为 0.009 m ($T=0$ m)、0.011 m ($T=20$ m)、0.010 m ($T=50$ m),远小于按照规范计算得到的 0.116 m。相对位移随深度的变化规律不符合规范建议的余弦函数的特征,余弦曲线明显低估浅部土层的位移变化率(剪应变),而高估深部土层的位移变化率(剪应变)。本文采用式(2)来预估低频地震动下浅部土层的相对位移,其中参数可取 $\alpha = 2.8$ 、 $n = 2$ 、 $H = 70$ m,该拟合关系具有一定的局限性,一般性尚需要更广泛的论证,但可对沿海地区地下工程地震响应分析提供参考。

5) 高频地震动下的相对位移较小,地表最大相对位移减小到 0.002~0.006 m,且在 70 m 深度范围内出现波长更短、频率更大的正负不同方向的双向振动,相对位移为 0 处出现在更浅的位置。在这种情况下,土层变形模式不符合规范建议的余弦函数形式,基准面深度 H 采用 70 m 也会大大高估浅部的相对位移。

参考文献:

- [1] 黄润秋, 余嘉顺. 软弱夹层特性对地震动强度影响的模拟研究[J]. 工程地质学报, 2003, 11(3): 312-317.
HUANG Runqiu, YU Jiashun. Modelling of the effects of properties of a buried weak layer on seismic waves[J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(3): 312-317. (in Chinese)
- [2] 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.
CHEN Guoxing, CHEN Jihua. The effect of depth and thickness of soft soil layer on earthquake response for deep soft sites[J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(3): 66-73. (in Chinese)
- [3] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海软土地震反应特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 773-778.
HUANG Yu, YE Weimin, TANG Yiqun, et al. Characteristic analysis for seismic ground response of soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 773-778. (in Chinese)
- [4] 许成顺, 许紫刚, 杜修力, 等. 地下结构抗震简化分析方法比较研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(2): 65-80.
XU Chengshun, XU Zigang, DU Xiuli, et al. Comparative study of simplified methods for seismic analysis of underground structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(2): 65-80. (in Chinese)
- [5] 安军海, 安林轩, 李积栋, 等. 浅埋地下结构抗震设计的反应位移法关键问题[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 926-932.
AN Junhai, AN Linxuan, LI Jidong, et al. Response displacement method in several key issues of shallow buried underground structure seismic design[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(6): 926-932. (in Chinese)
- [6] GB 50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
GB 50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [7] 川岛一彦. 地下构筑物的耐震设计[M]. 日本: 鹿岛出版会, 1994.
ICHIKO KAWASHIMA. Seismic design of underground structures [M]. Japan: Kashima Publishing Society, 1994. (in Japanese)
- [8] DG/TJ 08—2064—2022 地下铁道建筑结构抗震设计规范[S]. 上海: 同济大学出版社, 2022.
DG/TJ 08—2064—2022 Code for seismic design of underground railway building structures [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2022. (in Chinese)
- [9] 袁勇, 王祺. 上海软土地铁车站结构的横向地震响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(8): 191-197.
YUAN Yong, WANG Qi. Transverse seismic response analysis of Shanghai soft soil site metro station structure[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(8): 191-197. (in Chinese)
- [10] 王国波, 杨林德. 上海软土自由场地的三维地震响应分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 326-331.
WANG Guobo, YANG Linde. 3-D seismic response analysis of free-field soft soil in Shanghai[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(4): 326-331. (in Chinese)
- [11] 朱言灯. 土—地下结构地震动力响应分析及不同场地条件的影响[D]. 广州: 广州大学, 2013.
ZHU Yandeng. Earthquake dynamic response analyses of soil-underground structure and influence of different site conditions[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2013. (in Chinese)
- [12] 程学磊, 崔春义, 孙宗光. 饱和软土自由场地地震反应特性振动台试验[J]. 地震工程学报, 2019, 41(1): 108-116.
CHENG Xuelei, CUI Chunyi, SUN Zongguang. Shaking table tests on the seismic response characteristics of a free field in saturated soft soil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 108-116. (in Chinese)
- [13] 吴晔, 许紫刚, 杜修力. 软弱夹层对地下结构地震响应的影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(4): 91-97.
WU Ye, XU Zigang, DU Xiuli. Analysis of effects of weak interlayer on seismic responses of underground structures[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(4): 91-97. (in Chinese)
- [14] 冯忠居, 关云辉, 张聪, 等. 强震作用下桩-土-断层非线性动力响应特性[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(2): 62-70.
FENG Zhongju, GUAN Yunhui, ZHANG Cong, et al. Nonlinear dynamic response characteristics of pile-soil-fault under strong earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(2): 62-70. (in Chinese)
- [15] 张志明, 姚贵, 袁勇. 不同类型地震动作用下软土地铁车站动力响应试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(8): 198-203.
ZHANG Zhiming, YAO Gui, YUAN Yong. Experimental study on dynamic response of metro station in soft soil site under different types of seismic waves[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(8): 198-203. (in Chinese)
- [16] IDRIS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(4): 1003-1031.
- [17] 王天龙, 胡文尧. 上海覆盖土层的地震反应分析[C]//高大钊. 软土地基理论与实践. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
WANG Tianlong, HU Wenyao. Seismic response analysis of overlying soil layers in Shanghai [C]//Gao Dazhao. Theory and Practice of Soft Soil Foundation. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992: 55-61. (in Chinese)
- [18] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海深厚饱和覆盖土层的动力耦合地震反应分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 411-416.
HUANG Yu, YE Weimin, TANG Yiqun, et al. Coupled seismic response analysis of deep saturated soil covering layers in Shanghai[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 411-416. (in Chinese)
- [19] 胡钧, 杜坚. 上海场地土的脉动特性及剪切波速特征[J]. 物探与化探, 1997, 21(4): 305-307, 299.
HU Jun, DU Jian. Characteristics of pulsation and shear wave velocity of Shanghai site soil[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21(4): 305-307, 299. (in Chinese)
- [20] 禹海涛, 张正伟, 朱春成, 等. 关于反应位移法中地层变形模式的讨论[J]. 结构工程师, 2018, 34(2): 145-151.
YU Haitao, ZHANG Zhengwei, ZHU Chuncheng, et al. Discussion on the ground deformation mode in response displacement method [J]. Structural Engineers, 2018, 34(2): 145-151. (in Chinese)