

# 厚层淤泥质粉质黏土的动力特性 参数对地表地震动参数的影响<sup>①</sup>

夏 峰, 郭宝震, 余大新

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:**以天津滨海某软弱场地为例,在不同强度不同相位的地震动时程输入下,用等效线性化技术考虑土的动力非线性特性,计算水平成层场地的地震反应,研究天津地区厚层淤泥质粉质黏土的动剪模量比和阻尼比与剪应变幅值的关系曲线的变异性对深软场地地表峰值加速度及其反应谱的影响。结果表明:(1)在阻尼比较均值加减一倍标准差对地表地震动参数变化影响不大;(2)在动剪模量比均值增加或减小1倍标准差,对2%超越概率水平下地表峰值加速度影响显著,对应地表峰值加速度可能增加或减小20%~30%,其地表反应谱谱型也有变高变瘦或变矮变胖的趋势;(3)在动剪切模量均值减1倍标准差时,对10%超越概率水平下的地表峰值加速度的影响比较显著,减小幅度在15%左右,反应谱也存在变矮变胖的趋势;在动剪切模量均值加1倍标准差时,对10%超越概率水平下的地表地震动参数影响不明显;(4)在动剪切模量或阻尼比均值加减1倍标准差时,对63%的地表地震动参数影响均不明显。

**关键词:**土动力参数;变异性;土层地震反应;地震动峰值;反应谱曲线

**中图分类号:** TU43; P315.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2016)03-0391-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.03.0391

## Influence of Dynamic Characteristic Parameters of Thick Mucky Silty Clay on Surface Ground Motion Parameters

XIA Feng, GUO Bao-zhen, YU Da-xin

(First Crust Monitoring and Application Center of China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

**Abstract:** A soft site in the coastal area of Tianjin is used for analysis as an example of the seismic response of a site with horizontally-layered soil. The ground motion time history with different intensities and phases was input, and the equivalent linearization method was used to consider the nonlinear dynamic characteristics of the soil. This study also presents the effects of a relation between variability in the curves of dynamic parameters of a thick layer of mucky silty clay in the Tianjin area (including the soil dynamic shear modulus ratio and damping ratio) on the peak value of ground surface acceleration and its response spectra in deep soft sites. Numerical results obtained from a number of case studies were used to make a comparison with a standard condition, and the following was determined. Firstly, adding or reducing one standard deviation to the mean of the damping ratio has little effect on ground motion parameters. Secondly, addition or reduction of one standard deviation to the mean value of the dynamic shear modulus ratio has a prominent effect on the peak value of ground surface acceleration; when the ground motion time history

① 收稿日期:2015-05-12

基金项目:2015年度震情跟踪定向工作任务(2015010216)

作者简介:夏 峰,男,工程师,主要从事工程地震及地震监测分析预报方面的研究。E-mail:272861761@qq.com。

input is 2% of the 50 years transcendental probability the corresponding peak value of ground surface acceleration increases or decreases by 20% to 30%, and the surface response spectra is changed into a thin-high or short-fat trend. Thirdly, the mean value of the dynamic shear modulus ratio when one standard deviation is added, has a significant effect on the peak value of ground surface acceleration for 10% of the 50 year exceedance probability, the corresponding peak value of the ground surface ratio decreases by about 15% and the response spectra is changed into a short fat trend. Finally, when one standard deviation is added or subtracted from the mean value of the dynamic shear modulus ratio or damping ratio there is little effect on the value of ground motion parameters.

**Key words:** soil dynamic parameters; variability; soil seismic response; peak acceleration; response spectrum curves

## 0 引言

近年来我国沿海城市工程建设项目数量迅速增加,超高层和大跨度等建设难度颇大的工程日益增多。沿海城市工程场地以深软场地居多,且以厚层淤泥质土地地为代表,如何科学合理地确定该类场地工程抗震设防问题变得更加重要。

自 1998 年《中国人民共和国防震减灾法》颁布实施以来,全国范围广泛运用工程场地地震安全性评价方法确定一般重大工程抗震设防要求。该评价工作的三大技术核心是:地震危险性分析、人造地震动的合成和土层地震反应分析。对特定的地震环境而言,土层地震反应分析的合理性对工程设防要求的确定尤为关键。影响土层反应分析结果的因素主要包括土层计算界面选取<sup>[1-2]</sup>、土层厚度、密度、剪切波速、动剪切模量比和阻尼比等。

震害经验和土层地震反应分析结果均表明,土动力学参数是影响土层地震反应分析结果的主要原因之一<sup>[3]</sup>。目前土的动剪切模量比和阻尼比的确定主要通过动三轴或共振柱试验测定。由于实际工程场地千差万别,不同仪器的动剪模量比和阻尼比试验测试技术存在差异,以及影响土的动剪模量比和阻尼比因素的复杂性,试验结果具有较大的离散性,因此土的动剪切模量比和阻尼比参数都是基于大量试验数据资料给出的土的动剪模量比和阻尼比与剪应变幅值的平均值的关系曲线。国内外许多研究者对不同地区各类土的动剪切模量比和阻尼比进行了大量试验研究,并取得了许多有价值的研究成果<sup>[4-12]</sup>。然而这些成果忽略了特定场地土样的差异性对土层地震反应结果的影响,因此在确定重大工程建设非基岩场地的地震动参数时,GB 17741-2005《工程场地地震安全性评价》明确规定对有代表性的土层必须取样进行土动力参数测定。不确定性对土

层地震反应的影响已引起研究人员的关注,并得出了一些初步的规律<sup>[13-17]</sup>。但这些研究限于单一土的动剪切模量、阻尼比或均质场地土动力参数的不确定性对地表加速度峰值及其反应谱的影响,而对于同时考虑土的动剪切模量和阻尼比的离散程度(变异性)对场地地表地震动参数的影响尚缺乏研究;在工程场地地震安全性评价工作中,对土的动剪模量和阻尼比的测试结果以及基于此得出的场地设计地震动参数的可靠性也没有足够的把握。因此,深入研究土的动剪模量(剪切波速)和阻尼比的变异性对场地地表地震动的影响具有重要的现实意义。

据工程经验,对厚层淤泥质土地地,土层动剪切模量比和阻尼比对土层地震反应结果影响尤为明显。因篇幅所限,本文以天津滨海地区某深软场地为例,以文献[8]给出的淤泥质粉质黏土动三轴数据为基础,详细研究淤泥质粉质黏土的动剪切模量和阻尼比的变异性对地表地震动参数确定的影响。

## 1 工程场地地质条件

项目场地位于天津市滨海新区,属华北平原东部滨海平原地貌,其地层属海相与陆相交互沉积地层,为一典型的滨海软土地基,拟建场地由沿海滩正确涂经吹淤冲填或外采土方填垫而成。地基土按成因年代可分为 9 层:①人工填土层(Q<sub>m1</sub>);②全新统中组海相沉积层(Q<sub>4m</sub><sup>2</sup>);③全新统下组沼泽相沉积层(Q<sub>4h</sub><sup>1</sup>);④全新统下组陆相冲积层(Q<sub>4al</sub><sup>1</sup>);⑤上更新统第五组陆相冲积层(Q<sub>3al</sub><sup>1</sup>);⑥上更新统第四组滨海潮汐带沉积层(Q<sub>3mc</sub><sup>d</sup>);⑦上更新统第三组陆相冲积层(Q<sub>3al</sub><sup>a</sup>);⑧上更新统第一组陆相冲积层(Q<sub>3al</sub><sup>a</sup>)及⑨中更新统上组滨海三角洲沉积层(Q<sub>2mc</sub><sup>3</sup>)。

2 场地模型及参数确定

收集该工程场地地震安全性评价的钻孔勘察、波速测试和动三轴实验测试资料,建立如表 1 所列

的地震反应分析模型。表 2 为本场地地震安全性评价工作确定地表地震动参数进行的动三轴实验测试数据。

表 1 场地模型土层钻孔剖面参数  
Table 1 Soil profile parameters of the model

| 土层序号 | 土类号 | 层厚/m | 波速 $v_s/(m \cdot s^{-1})$ | 密度/ $(t \cdot m^{-3})$ | 土质类别    | 成因年代                           |
|------|-----|------|---------------------------|------------------------|---------|--------------------------------|
| 1    | 1   | 1.2  | 122                       | 1.93                   | 冲填土     | Q <sub>ml</sub>                |
| 2    | 1   | 1.2  | 126                       | 1.93                   | 冲填土     |                                |
| 3    | 1   | 1.6  | 129                       | 1.93                   | 冲填土     |                                |
| 4    | 1   | 1.7  | 115                       | 1.93                   | 冲填土     |                                |
| 5    | 2   | 1.3  | 111                       | 1.79                   | 淤泥质粉质黏土 | Q <sub>4</sub> <sup>2</sup> m  |
| 6    | 2   | 1.5  | 119                       | 1.79                   | 淤泥质粉质黏土 |                                |
| 7    | 2   | 1.5  | 123                       | 1.79                   | 淤泥质粉质黏土 |                                |
| 8    | 2   | 2.0  | 126                       | 1.79                   | 淤泥质粉质黏土 |                                |
| 9    | 2   | 2.0  | 133                       | 1.79                   | 淤泥质粉质黏土 |                                |
| 10   | 2   | 2.0  | 134                       | 1.79                   | 淤泥质粉质黏土 |                                |
| 11   | 2   | 3.0  | 142                       | 1.79                   | 淤泥质粉质黏土 |                                |
| 12   | 3   | 2.5  | 191                       | 2.02                   | 粉土      |                                |
| 13   | 4   | 2.6  | 199                       | 2.00                   | 粉质黏土    | Q <sub>1</sub> <sup>1</sup> h  |
| 14   | 4   | 2.9  | 222                       | 2.00                   | 粉质黏土    | Q <sub>3</sub> <sup>1</sup> al |
| 15   | 4   | 4.0  | 235                       | 2.00                   | 粉质黏土    |                                |
| 16   | 4   | 2.5  | 240                       | 1.93                   | 粉质黏土    |                                |
| 17   | 5   | 3.0  | 221                       | 1.93                   | 黏土      | Q <sub>3</sub> <sup>1</sup> al |
| 18   | 5   | 3.3  | 237                       | 1.93                   | 黏土      |                                |
| 19   | 6   | 3.2  | 310                       | 1.96                   | 粉质黏土    | Q <sub>3</sub> <sup>d</sup> mc |
| 20   | 6   | 3.0  | 343                       | 1.96                   | 粉质黏土    |                                |
| 21   | 6   | 2.5  | 377                       | 1.96                   | 粉质黏土    |                                |
| 22   | 7   | 3.5  | 368                       | 2.01                   | 粉质黏土    | Q <sub>3</sub> <sup>e</sup> al |
| 23   | 7   | 3.0  | 354                       | 2.01                   | 粉质黏土    |                                |
| 24   | 8   | 2.0  | 393                       | 2.01                   | 粉土      |                                |
| 25   | 7   | 1.8  | 389                       | 2.01                   | 粉质黏土    |                                |
| 26   | 9   | 3.2  | 429                       | 2.07                   | 粉砂      | Q <sub>3</sub> <sup>a</sup> al |
| 27   | 9   | 4.0  | 435                       | 2.07                   | 粉砂      |                                |
| 28   | 9   | 2.3  | 419                       | 2.07                   | 粉砂      |                                |
| 29   | 10  | 4.7  | 388                       | 2.01                   | 粉质黏土    | Q <sub>2</sub> <sup>3</sup> mc |
| 30   | 10  | 4.0  | 425                       | 2.01                   | 粉质黏土    |                                |
| 31   | 10  | 3.5  | 412                       | 2.01                   | 粉质黏土    |                                |
| 32   | 11  | 2.5  | 475                       | 2.10                   | 粉砂      |                                |
| 33   | 11  | 4.0  | 482                       | 2.10                   | 粉砂      |                                |
| 34   | 11  | 4.0  | 492                       | 2.10                   | 粉砂      |                                |
| 35   | 12  | 基底   | 531                       | 2.00                   | 粉砂      |                                |

3 输入地震动的选取

考虑工程场地所处的地震地质环境,对场址所在区域地震区带和潜在震源区进行划分并确定其相关地震参数。在考虑对场地有影响范围的基础上,进行场地地震危险性分析计算,得到了场地 50 年超越概率 2%、10%和 63%的基岩 5%阻尼比的反应谱曲线(图 1),其对应的基岩加速度峰值分别为 371.1 gal、200.4 gal 和 57.4 gal。

基岩加速度的工程特性主要由加速度峰值、频谱和振动持续时间这三个要素决定。将地震危险性分析得到的基岩峰值加速度和反应谱作为合成

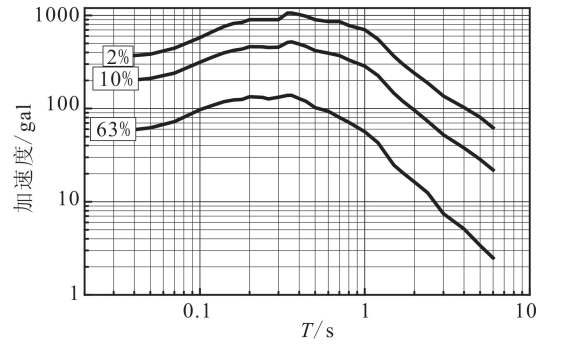


图 1 场地基岩不同超越概率反应谱  
Fig.1 Site rock response spectrum curves with different exceedance probabilities

的目标函数,结合适应本场址地区地震活动特征的强度包络函数,采用拟合目标函数的三角级数迭加法合成基岩地震加速度时程,作为场地地震动反应分析的输入基岩地震动加速度的时程。给出三个以上相互独立的随机样本时程,反应谱拟合周期控制点数不得少于 50 个,周期控制点应大体均匀地

分布于周期的对数坐标上,控制点谱的相对误差应小于 5%。本次工作在满足上述技术要求前提下,以场地地震危险性分析得到 50 年超越概率 2%、10%和 63%的基岩反应谱为目标谱各合成三个相互独立样本时程,作为土层地震反应分析的输入,如下图 2 所示。

表 2 场地土层地震反应分析模型土动力学参数  
Table 2 Dynamic parameters of the site soil of the seismic response analysis model

| 动土样<br>编号 | 土类型     | 参数           | 剪应变/( $\times 10^{-4}$ ) |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------|---------|--------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           |         |              | 0.05                     | 0.1     | 0.5     | 1       | 5       | 10      | 50      | 100     |
| 1         | 冲填土     | $G/G_{\max}$ | 0.996 2                  | 0.992 5 | 0.964 1 | 0.931 6 | 0.744 1 | 0.603 3 | 0.252 7 | 0.148 7 |
|           |         | $\lambda$    | 0.039 3                  | 0.047 8 | 0.075 8 | 0.092 8 | 0.145 0 | 0.169 3 | 0.211 7 | 0.221 2 |
| 2         | 淤泥质粉质黏土 | $G/G_{\max}$ | 0.995 4                  | 0.990 9 | 0.956 0 | 0.915 8 | 0.688 2 | 0.527 3 | 0.185 7 | 0.102 9 |
|           |         | $\lambda$    | 0.041 9                  | 0.052 0 | 0.084 9 | 0.104 0 | 0.157 0 | 0.178 9 | 0.212 1 | 0.218 5 |
| 3         | 粉土      | $G/G_{\max}$ | 0.991 7                  | 0.983 6 | 0.925 5 | 0.865 8 | 0.601 4 | 0.449 1 | 0.156   | 0.086 7 |
|           |         | $\lambda$    | 0.022 5                  | 0.029 6 | 0.055 7 | 0.072 2 | 0.117 5 | 0.135   | 0.160 2 | 0.165   |
| 4         | 粉质黏土    | $G/G_{\max}$ | 0.994 7                  | 0.989 4 | 0.949 3 | 0.903 6 | 0.654 0 | 0.487 3 | 0.161 2 | 0.087 8 |
|           |         | $\lambda$    | 0.026 2                  | 0.034 3 | 0.063 4 | 0.081 8 | 0.135 7 | 0.158 8 | 0.193 5 | 0.200 1 |
| 5         | 黏土      | $G/G_{\max}$ | 0.997 1                  | 0.994 2 | 0.971 7 | 0.945 0 | 0.775 4 | 0.634 2 | 0.259 8 | 0.149 8 |
|           |         | $\lambda$    | 0.038 4                  | 0.047 0 | 0.074 9 | 0.091 0 | 0.137 8 | 0.159 1 | 0.195 8 | 0.203 9 |
| 6         | 粉质黏土    | $G/G_{\max}$ | 0.994 7                  | 0.989 4 | 0.949 3 | 0.903 6 | 0.654 0 | 0.487 3 | 0.161 2 | 0.087 8 |
|           |         | $\lambda$    | 0.026 2                  | 0.034 3 | 0.063 4 | 0.081 8 | 0.135 7 | 0.158 8 | 0.193 5 | 0.200 1 |
| 7         | 粉质黏土    | $G/G_{\max}$ | 0.991 2                  | 0.982 4 | 0.917 5 | 0.847 6 | 0.526 4 | 0.357 2 | 0.100 1 | 0.052 7 |
|           |         | $\lambda$    | 0.019 6                  | 0.027 4 | 0.058 0 | 0.078 3 | 0.136 2 | 0.158 1 | 0.186 4 | 0.191 1 |
| 8         | 粉土      | $G/G_{\max}$ | 0.996 1                  | 0.992 3 | 0.962 6 | 0.927 9 | 0.723 0 | 0.568 7 | 0.212 9 | 0.119 8 |
|           |         | $\lambda$    | 0.046 7                  | 0.055 7 | 0.083 9 | 0.099 5 | 0.141 4 | 0.158 9 | 0.186 0 | 0.191 5 |
| 9         | 粉砂      | $G/G_{\max}$ | 0.995 2                  | 0.990 4 | 0.953 5 | 0.911 1 | 0.672 0 | 0.506 1 | 0.170 1 | 0.093 0 |
|           |         | $\lambda$    | 0.020 7                  | 0.027 2 | 0.050 8 | 0.065 8 | 0.110 6 | 0.130 2 | 0.160 1 | 0.165 9 |
| 10        | 粉质黏土    | $G/G_{\max}$ | 0.997 0                  | 0.993 9 | 0.969 9 | 0.941 5 | 0.762 8 | 0.616 5 | 0.243 3 | 0.138 6 |
|           |         | $\lambda$    | 0.035 0                  | 0.043 5 | 0.071 6 | 0.088 2 | 0.136 8 | 0.159 1 | 0.197 0 | 0.205 2 |
| 11        | 粉砂      | $G/G_{\max}$ | 0.995 2                  | 0.990 5 | 0.955 1 | 0.915 7 | 0.706 6 | 0.561 8 | 0.222 8 | 0.128 0 |
|           |         | $\lambda$    | 0.064 4                  | 0.071 6 | 0.092 8 | 0.104 0 | 0.131 7 | 0.142 3 | 0.158 0 | 0.161 2 |
| 12        | 粉砂      | $G/G_{\max}$ | 0.993 0                  | 0.986 2 | 0.935 1 | 0.878 2 | 0.590 6 | 0.419 0 | 0.126 0 | 0.067 2 |
|           |         | $\lambda$    | 0.017 5                  | 0.023 9 | 0.048 9 | 0.065 3 | 0.114 0 | 0.133 8 | 0.161 3 | 0.166 2 |

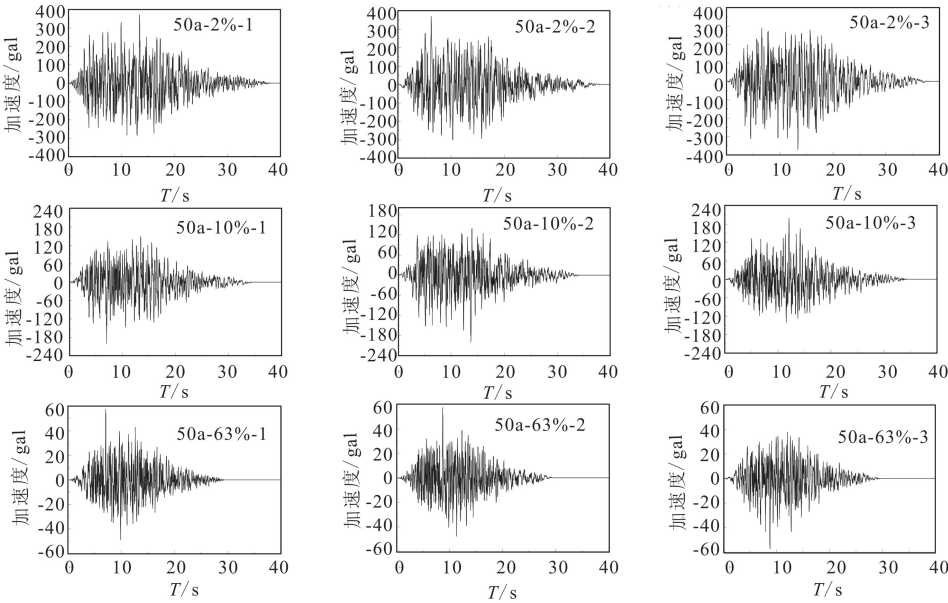


图 2 场地基岩不同超越概率人造地震动时程  
Fig.2 Artificial ground motion time-history of the site rock with different exceedance probabilities

4 场地地震反应分析

为研究淤泥质粉质黏土动力学参数变异性对地表地震动参数的影响,收集了天津 68 个原状土样的动三轴试验结果,现以文献[8]的统计方法,给

出天津地区淤泥质粉质黏土的动剪切模量比和阻尼比与剪应变幅值的平均关系曲线及其代表值;同时给出土的动剪切模量比和阻尼比的标准差,如表 3 所列。

表 3 天津地区淤泥质粉质黏土的  $G/G_{\max}$ - $\gamma$  和  $\lambda$ - $\gamma$  平均关系曲线代表值及其标准差  
Table 3 Mean values and standard deviation of  $G/G_{\max}$ - $\gamma$  and  $\lambda$ - $\gamma$  curves for mucky silty clay in Tianjin area

| 参数           | 最大值 | 剪应变 $\gamma/(\times 10^{-4})$ |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|-----|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|              |     | 0.05                          | 0.1     | 0.5     | 1       | 5       | 10      | 50      | 100     |
| $G/G_{\max}$ | 平均值 | 0.995 1                       | 0.989 4 | 0.949 7 | 0.904 9 | 0.664 4 | 0.503 8 | 0.175 6 | 0.097 2 |
|              | 标准差 | 0.002 5                       | 0.004 5 | 0.020 3 | 0.036 4 | 0.090 8 | 0.099 4 | 0.055 0 | 0.033 0 |
| $\lambda$    | 平均值 | 0.034 5                       | 0.042 9 | 0.070 5 | 0.086 7 | 0.133 1 | 0.154 0 | 0.194 3 | 0.208 6 |
|              | 标准差 | 0.005 2                       | 0.006 2 | 0.009 4 | 0.011 2 | 0.013 3 | 0.011 3 | 0.016 0 | 0.032 9 |

以淤泥质粉质黏土的动剪切模量比和阻尼比的代表值及其一倍标准差组合成 9 种工况[表 4(其中  $\lambda$  为阻尼比,  $\bar{\lambda}$  为阻尼比平均值,  $\lambda_{\sigma}$  为阻尼比标准差,  $G/G_{\max}$  为动剪切模量比,  $\overline{G/G_{\max}}$  为动剪切模量比均值,  $(G/G_{\max})_{\sigma}$  为动剪切模量比标准差)],外加本地淤泥质粉质黏土的动剪切模量比和阻尼比实测工况,共 10 种工况。

表 4 土的动剪模量比和阻尼比与剪应变幅值关系曲线变异性的不同组合

Table 4 Different combination of the variability of relation curve of shear strain with soil dynamic shear modulus ratio and damping ratio

| 参数组合                             | $\overline{G/G_{\max}}$ | $\overline{G/G_{\max}}+(G/G_{\max})_{\sigma}$ | $\overline{G/G_{\max}}-(G/G_{\max})_{\sigma}$ |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $\bar{\lambda}$                  | 标准工况                    | 工况 3                                          | 工况 6                                          |
| $\bar{\lambda}+\lambda_{\sigma}$ | 工况 1                    | 工况 4                                          | 工况 7                                          |
| $\bar{\lambda}-\lambda_{\sigma}$ | 工况 2                    | 工况 5                                          | 工况 8                                          |

4.1 地表峰值加速度的影响

在上文给出的人造地震动时程同等输入情况下分别进行 10 种工况的土层等效线性化地震反应分析计算。在土层其他输入参数不变的情况下,仅改变淤泥质黏土层的动剪模量比和阻尼比的不同组合值,计算得到不同工况下地表峰值加速度和相比标准工况时的增幅值见表 5,其对应的反应谱计算结果见图 3。

从表 5 可以看出,标准工况和实测工况计算峰值加速度差别不大,这表明本文给出的统计结果是可信的;和标准工况的地表地震动峰值加速度相比,在输入不同地震动强度和不同相位时工况 1 和 2 均与之差别不大,这表明阻尼比均值加减 1 倍标准差

对峰值加速度影响有限;而动剪切模量比均值加减 1 倍标准差,对大震和中震的地表峰值加速度影响显著,对小震影响不太明显。动剪切模量比均值加 1 倍标准差(工况 3、4 和 5),相比标准工况对大震峰值加速度有显著增大趋势,在不同相位输入情况下增大幅度在 10%~30%左右,而对中震和小震影响不太明显;动剪切模量比均值减 1 倍标准差(工况 6、7 和 8),相比标准工况对大震、中震和小震峰值加速度有均有减小趋势,在不同相位输入情况下其减小幅度随地震输入强度增大而增大,而对中震和小震影响不太明显。

4.2 对地表加速度反应谱的影响

在不同强度和不同相位地震动时程条件输入下,不同工况时的地表加速度反应谱如图 3 所示。从图中可见,土的动剪模量比和阻尼比与剪应变幅值关系曲线的变异性在大震和中震输入条件下对加速度反应谱形状有一定影响,在小震输入条件下影响不大;在大震和中震输入条件下,工况 6、7、8 反应谱明显偏低偏胖,场地的卓越周期有所增大,其中大震条件下尤为明显;在大震和中震输入条件下,工况 3、4、5 反应谱明显偏高偏瘦,场地的卓越周期也有所减小;相比之下,阻尼比平均值加减标准差(工况 1、2)对反应谱的影响有限。

5 结语

本文以天津某软弱场地为例,讨论了在不同地震动强度输入下厚层淤泥质黏土层的动剪模量比和阻尼比与剪应变幅值关系曲线的变异性对地表地震动参数确定的影响,计算结果分析表明相比标准工况:

表 5 场地各工况地表峰值加速度及相比标准工况下的增幅值结果表

| Table 5 Peak ground acceleration under different working conditions and the increase compared with that under standard condition |   |      |       |       |        |        |        |        |        |         |         |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 输入工况                                                                                                                             |   | 实测工况 | 标准工况  | 工况 1  | 工况 2   | 工况 3   | 工况 4   | 工况 5   | 工况 6   | 工况 7    | 工况 8    |         |
| 大震(2%)<br>三相位                                                                                                                    | 1 | 峰值   | 290.0 | 270.4 | 271.6  | 262.9  | 357.1  | 353.9  | 362.2  | 193.5   | 188.6   | 210.5   |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | 0.04%  | -2.77% | 32.06% | 30.88% | 33.95% | -28.44% | -30.25% | -22.15% |
|                                                                                                                                  | 2 | 峰值   | 278.0 | 268.4 | 265.2  | 270.4  | 321.7  | 317.5  | 328.8  | 202.9   | 196.0   | 217.4   |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | -0.12% | 0.75%  | 19.86% | 18.29% | 22.50% | -24.40% | -26.97% | -19.00% |
|                                                                                                                                  | 3 | 峰值   | 267.3 | 262.5 | 258.6  | 264.6  | 296.8  | 292.2  | 301.7  | 185.3   | 180.2   | 194.2   |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | -1.49% | 0.80%  | 13.07% | 11.31% | 14.93% | -29.41% | -31.35% | -26.02% |
| 中震(10%)<br>三相位                                                                                                                   | 1 | 峰值   | 178.3 | 183.3 | 179.9  | 187.7  | 184.8  | 181.8  | 187.9  | 155.4   | 154.5   | 157.3   |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | -0.19% | 2.40%  | 0.82%  | -0.82% | 2.51%  | -15.22% | -15.71% | -14.18% |
|                                                                                                                                  | 2 | 峰值   | 185.4 | 189.6 | 185.3  | 194.3  | 197.7  | 194.2  | 201.3  | 147.9   | 146.9   | 147.4   |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | -0.23% | 2.48%  | 4.27%  | 2.43%  | 6.17%  | -21.99% | -22.52% | -22.26% |
|                                                                                                                                  | 3 | 峰值   | 169.9 | 174.3 | 171.2  | 178.9  | 182.8  | 179.3  | 186.4  | 148.8   | 145.8   | 150.3   |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | -0.18% | 2.64%  | 4.88%  | 2.87%  | 6.94%  | -14.63% | -16.35% | -13.77% |
| 小震(63%)<br>三相位                                                                                                                   | 1 | 峰值   | 69.9  | 72.1  | 70.6   | 73.7   | 72.4   | 70.8   | 74.0   | 70.4    | 68.8    | 72.0    |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | -2.08% | 2.22%  | 0.42%  | -1.80% | 2.64%  | -2.36%  | -4.58%  | -0.14%  |
|                                                                                                                                  | 2 | 峰值   | 70.4  | 72.9  | 71.3   | 74.6   | 72.9   | 71.3   | 74.7   | 70.0    | 68.3    | 71.8    |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | -2.19% | 2.33%  | 0      | -2.19% | 2.47%  | -3.98%  | -6.31%  | -1.51%  |
|                                                                                                                                  | 3 | 峰值   | 70.1  | 72.0  | 70.7   | 73.4   | 72.7   | 71.3   | 74.2   | 69.5    | 68.1    | 71.1    |
|                                                                                                                                  |   | 增幅   | -     | -     | -1.81% | 1.94%  | 0.97%  | -0.97% | 3.06%  | -3.47%  | -5.42%  | -1.25%  |

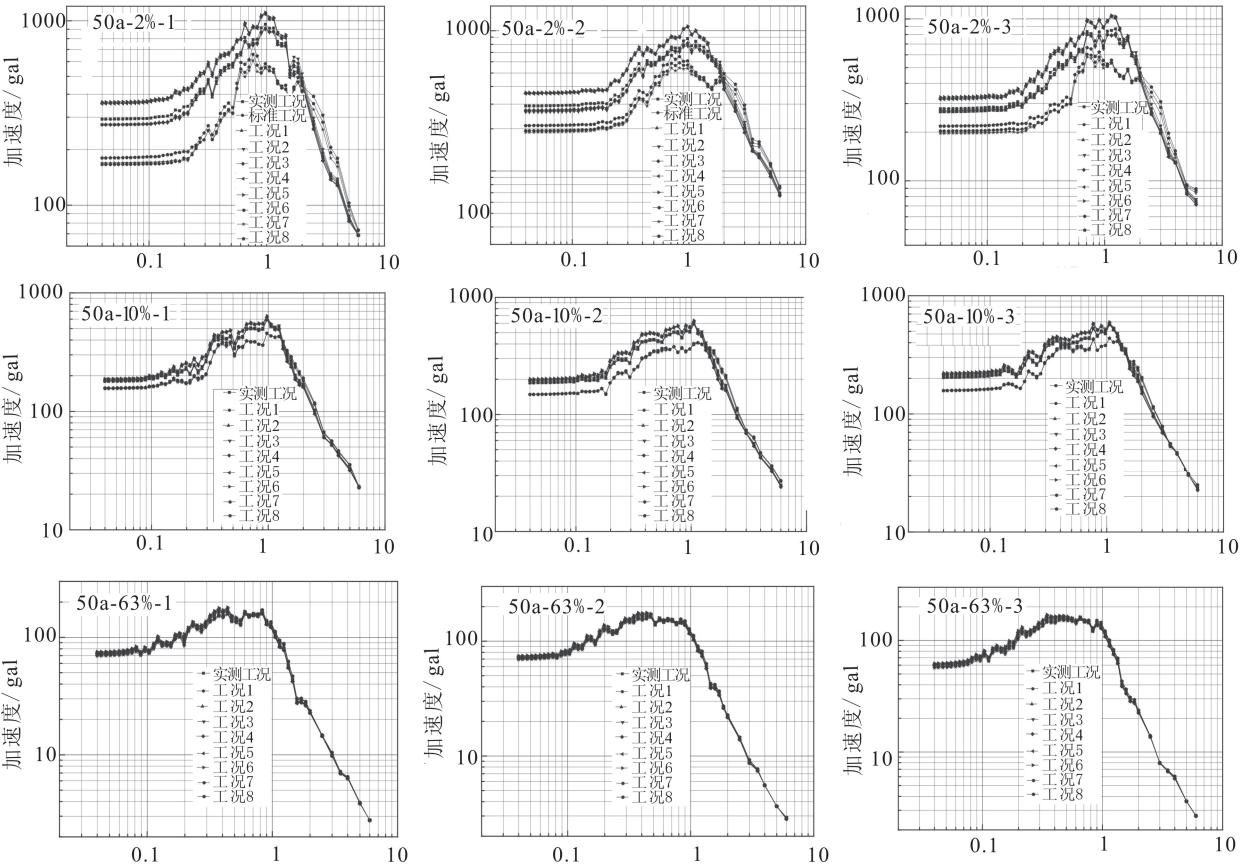


图 3 不同工况不同相位不同超越概率水平地表加速度反应谱图

Fig.3 The horizontal acceleration response spectrum curves with different exceedance probabilities and different phases under different conditions

(1) 在阻尼比较均值加减 1 倍标准差对地表地震动参数变化影响不大；

(2) 在动剪模量比均值增加或减 1 倍标准差,对 2%超越概率水平下地表峰值加速度影响显著,对应

地表峰值加速度可能增加或减小20%~30%,其地表反应频谱型也有变高变瘦或变矮变胖的趋势。

(3) 在动剪切模量均值减1倍标准差时,对10%超越概率水平下的地表峰值加速度的影响影响比较显著,其减小幅度在15%左右,其反应谱也存在变矮变胖的趋势;在动剪切模量均值加1倍标准差时,对10%超越概率水平下的地表地震动参数影响不明显。

(4) 在动剪切模量或阻尼比均值加减1倍标准差时,对63%的地表地震动参数影响均不明显。

综上所述,对于含厚层淤泥质粉质黏土层的软弱场地,在确定其地表地震动参数时,应充分考虑淤泥质粉质黏土层在取样、实验和实验结果数据处理上造成的变异性对地表地震动参数确定带来的影响,否则可能严重低估场地地震危险性,给出不科学的工程设防依据,从而带来不必要经济损失。

## 参考文献(References)

- [1] 王冲,刘明军,齐文浩,等.输入界面对反应谱平台值的影响[J].世界地震工程,2015,31(2):119-126.  
WANG Chong, LIU Ming-jun, QI Wen-hao, et al. Effects of Inputting Interface of Earthquake Wave on Platform Value of Response Spectra[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2015, 31(2): 119-116. (in Chinese)
- [2] 王冲,贺为民,齐文浩,等.输入界面对反应谱特征周期的影响[J].世界地震工程,2015,31(3):156-163.  
WANG Chong, HE Wei-min, QI Wen-hao, et al. Effect of Inputting Interface on Characteristic Period of Response Spectra[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2015, 31(3): 156-163. (in Chinese)
- [3] 王绍博,丁海平.土动力参数对土层动力反应的影响[J].地震工程与工程震动,2001,21(1):105-108.  
WANG Shao-bo, DING Hai-ping. Effect of Soil Dynamic Parameters on Seismic Responses of Soil Layers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 105-108. (in Chinese)
- [4] 袁晓铭,孙锐,孙静,等.常规土类动剪切模量比和阻尼比的试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):133-139  
YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Soil[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 133-139. (in Chinese)
- [5] 陈国兴,刘雪珠,朱定华,等.南京新近沉积土的动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(8):1023-1027.  
CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, ZHU Ding-hua, et al. Experimental Studies on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Recently Deposited Soils in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 1023-1027. (in Chinese)
- [6] 吕悦军,唐荣余.渤海海底土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(2):35-42.

- LV Yue-jun, TANG Rong-yu. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of the Soil of Bohai Sea Floor[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(2): 35-42. (in Chinese)
- [7] 孙静.岩土动剪切模量阻尼试验及应用研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2004.  
SUN Jing. Experiment and Application Studies on Dynamic Shear Modulus and Damping of Geotechnical Media[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2004. (in Chinese)
- [8] 夏峰,宋成科,孟庆筱,等.天津地区覆盖层土动力学参数统计分析[J].地震工程学报,2015,37(1):48-54.  
XIA Feng, SONG Cheng-ke, MENG Qing-xiao, et al. Analysis of Soil Dynamic Parameters of Overburden in Tianjin Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 48-54. (in Chinese)
- [9] Kokusho T. Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range[J]. Soils and Foundations, 1980, (2): 45-60.
- [10] Seed H B, Wong R T, Idriss IM, et al. Modulus and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils[J]. Journal of Geot. Eng. ASCE, 1986(11): 1016-1032.
- [11] Rollins K, Evans M D, Diehl N B, et al. Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Eng. ASCE, 1998(5): 396-405.
- [12] Vucetic M, Dobry R. Degradation of Marine Clays under Cyclic Loading[J]. Journal of Geot. Eng. ASCE, 1988(2): 133-149.
- [13] 赵松戈,胡丰贤,廖旭.土层参数的随机性对场地传递函数的影响[J].地震工程与工程振动,2000,20(2):7-12.  
ZHAO Song-ge, HU Yu-xian, LIAO Xu. Effect of Soil Parameter Variations on Soil Transfer Function[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(2): 7-12. (in Chinese)
- [14] 石玉成,蔡红卫,徐晖平,等.场地地震反应分析中的不确定性及其处理方法[J].西北地震学报,1999,21(3):242-247.  
SHI Yu-cheng, CAI Hong-wei, XU Hui-ping, et al. Uncertainties in Site Earthquake Response and the Way of Its Processing[J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(3): 242-247. (in Chinese)
- [15] 楼梦麟,严国香,沈建文,等.上海软土动力参数变异性对土层地震反应的影响[J].岩土力学,2004,25(9):1368-1372.  
LOU Meng-lin, YAN Guo-xiang, SHEN Jian-wen, et al. Effect of Variability of Dynamic Parameters of Soft Soil in Shanghai Region on Seismic Response of Layered Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1368-1372. (in Chinese)
- [16] 刘红帅,薄景山,吴兆营,等.土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响[J].地震工程与工程振动,2005,25(2):167-171.  
LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, WU Zhao-yin, et al. Effects of Soil Parameters on Ground Surface Acceleration Peak and Response Spectra[J]. Journal of Seismological Research, 2005, 25(2): 167-171. (in Chinese)
- [17] 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,2001,29(1):39-42.  
GAO Yu-feng, LIU Han-long, ZHU Wei, et al. Effects of Shear Wave Velocity on Seismic Response of Sand Site[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001, 29(1): 39-42. (in Chinese)