

文章编号: 1000-7598-(2005) 09-1495-04

互层土的动参数试验研究及其地震反应分析

庄海洋, 刘雪珠, 陈国兴

(南京工业大学 岩土工程研究所, 南京 210009)

摘 要: 通过对两个工程场地的淤泥质粉质粘土、粉土、粘土、粉细砂及粉土与(粉质)粘土、粘土与粉砂互层土的自振柱试验结果进行分析, 给出了部分土的 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 曲线, 与 Seed 和 Idriss 建议的砂土和粘性土的 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 曲线变化范围进行了对比; 同时分析了这两个场地的地震反应, 结果表明: 在强震时互层土对地震波有很强的滤波作用, 且互层土的最大剪应变远大于一般土, 在水平地震作用下很容易接近或达到破坏状态。初步分析结果表明: 互层土具有软土的动力特性, 这主要是由互层土的特殊物理构造造成的, 即在互层土中存在很密的水平薄弱面。

关 键 词: 互层土; 动剪切模量; 阻尼比; 场地反应; 软弱场地

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

A study on dynamic parameters and seismic response of interbedded soil

ZHUANG Hai-yang, LIU Xue-zhu, CHEN Guo-xing

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: By using resonant column apparatus, the dynamic parameters of interbedded soil and other soils in two sites are tested; the curves of dynamic shear modulus ratio $G/G_{\max}$ and damping ratio versus dynamic shear strain amplitude γ of the soils in two sites are given. Compared with the variation range of $G/G_{\max}$ vs. γ and D vs. γ curves of other soils, it is obviously that the $G/G_{\max}$ vs. γ and D vs. γ curves of mucky silty clay and fine sand interbedded strata are more close to those of soft clay. By calculating the seismic response of the two sites, the results show that the interbedded soil weakens the peak acceleration greatly and its maximal shear strain amplitude is very big which is near to be failure under horizontal earthquake. The dynamic characteristic of interbedded soil is similar to that of soft soil; and this property is caused by its special conformation, i.e. the feeble horizontal joint planes are overgrown.

Key words: interbedded soil; dynamic shear modulus; damping ratio; seismic response; soft soil.

1 引 言

我国《岩土工程勘察规范》中规定: 天然孔隙比大于或等于 1.0, 且天然含水量大于液限的细粒土应判为软土。南京及其周边地区的软土, 根据成因属于河漫滩相沉积软土, 沉积零乱, 成分复杂, 粉细砂中夹淤泥质透镜体或淤泥质土中夹砂、淤泥质土与粉砂互层, 古河道、牛轭湖中土质甚至成流塑状态。由于该场地处于海积相漫滩地带, 上覆土层较厚, 局部厚度达到 100 m 左右, 且上部流塑状态的淤泥质粉质粘土厚度较大, 属于抗震不利地段^[1~3]。深厚软土地基上的建筑在地震时遭遇严重破坏的例子已屡见不鲜, 如委内瑞拉加拉加斯地震中, 软粘土厚度由 0 变化到 300 m, 震害严重的房屋主要为建造在 160~300 m 厚土层上的 10 层以上的房屋^[4]。

本文对含有互层土的两个典型场地土体进行了动剪模量与阻尼比的试验研究, 并分别对场地的地震反应进行了分析。场地条件见表 1 和表 2。场地 1 为一个深厚软弱地基, 覆盖土层厚度为 98.7 m, 互层土主要表现为粉质粘土与粉土互层和粉土与粘土互层, 互层土的埋深在 32~45 m 范围内; 场地 2 为一个土层覆盖层相对较浅的软弱地基, 覆盖土层厚度为 50 m, 互层土以粉土与粉砂互层为主, 分布范围在 6.50~9.10 m。

2 试验仪器、试样和试验方法^[5]

2.1 试验仪器

本次试验采用南京工业大学土木工程学院自行研制的 GZZ-1 型自振柱仪^[5]。该仪器可在试样未破

收稿日期: 2004-04-05

修改稿收到日期: 2004-06-14

基金项目: 江苏省结构工程重点实验室基金(No. KJSS0201)和江苏省自然科学基金(No. BK2004124)联合资助。

作者简介: 庄海洋, 男, 1978 年生, 博士生, 主要从事岩土工程和地下结构抗震性能研究。E-mail: zhuang7802@163.com

损的小应变范围内 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 研究土的动力性质, 主要根据自由振动方法确定土的动剪模量和阻尼比。采用计算机控制整个试验过程及采集试验数据, 故该设备具有良好的试验测试精度。

表 1 场地 1

Table 1 The condition of site No.1

土层编号	土样描述	层底埋深 /m	γ /kN·m ⁻³	平均 V_s /m·s ⁻¹
1	淤泥质粉质粘土 (流塑)	4.7	18.3	112
2	淤泥质粉质粘土 (流塑)	10.80	17.6	122
3	粘土 (可塑)	32.1	19.3	199
4	粉质粘土与粉土互层 (可塑)	39.0	18.9	217
5	粉土与粘土互层 (可塑)	46.0	19.3	232
6	粉质粘土 (硬塑)	53.8	19.1	250
7	粉质粘土 (硬塑)	60.1	19.9	384
8	粉质粘土含结核 (硬塑)	63.3	19.8	416
9	粉质粘土 (可塑)	67.0	20.1	278
10	粉土	70.0	20.4	357
11	粉土	73.0	19.8	370
12	粉土粉质粘土互层 (可塑)	74.7	19.1	384
13	粘土含结核 (硬塑)	80.1	20.6	434
14	粘土 (含粉土夹层、硬塑)	88.1	19.1	454
15	粘土 (硬塑)	98.7	19.5	416

表 2 场地 2

Table 2 The condition of site No.2

土层编号	土样描述	层底埋深 /m	γ /kN·m ⁻³	平均 V_s /m·s ⁻¹
1	素填土 (流塑)	1.80	17.8	122.0
2	淤泥质粉质粘土 (流塑)	6.50	17.4	107.6
3	粉土与粉砂互层 (稍密~松散)	9.10	19.0	128.6
4	粉质粘土 (夹粉砂、稍密)	19.10	19.0	168.4
5	粉细砂 (局部夹粉土、稍密~中密)	34.50	18.9	204.4
6	粉细砂 (局部夹粉土、中密)	44.80	20.00	204.4
7	粉细砂夹砾砂 (中密~密实)	50.00	21.2	239.1

2.2 试样与试验方法

自振柱试验土样尺寸如下: 直径 $D=3.91$ cm, 高 $H=8.00$ cm。试样均为原状样, 给试样施加不同的等向围压并使其固结, 逐级施加振动应力, 测取试样扭转方向的自振频率和相应的剪应变振动曲线, 计算动剪切模量和阻尼比。

2.3 土的动剪切模量和阻尼比与剪应变的关系^[6]

自振柱仪扭转试验直接测定土样的动剪切模量 G 和阻尼比 λ , 采用等效线性化模型描述土的动剪切模量和阻尼比与剪应变的关系, 动剪切模量用扭转自由振动的试验结果, 用双对数坐标绘制 $\lambda - (1-G/G_{\max})$ 关系曲线, 即可求出 $\lambda_{\max}$, n_λ 。可按下式描述:

$$G/G_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (1)$$

式中 $G_{\max}$ 为土的动剪切模量最大值; G 为与剪应

变相对应的剪切模量; γ 为剪应变幅值; γ_r 为参考剪应变。

根据波动理论, $G_{\max}$ 与剪切波速之间的关系如下:

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

式中 V_s 为剪切波速; ρ 为土样密度。

土的阻尼比 λ 随剪应变幅值而变化, 可用下述经验关系描述:

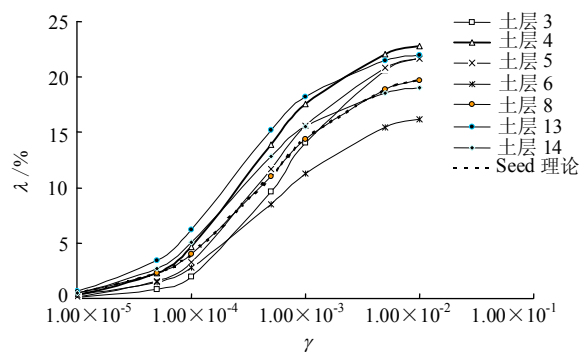
$$\lambda = \lambda_{\max} (1 - G/G_{\max})^{n_\lambda} \quad (3)$$

式中 $\lambda_{\max}$ 为阻尼比的最大值; n_λ 为试验指数。

3 试验结果与分析

3.1 场地 1

土体主要以粉质粘土和粘土为主, 即为深厚粘性土地, 随着土层埋深的增大, 试验中试样所施加的围压也随之增大, 从图 1 和图 2 曲线的总体变化趋势来看, 对于粘性土, 随着埋深的增加, $\lambda - \gamma$ 曲线越高, 而 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线越低, 场地 1 中粉质粘土与粉土互层土的 $\lambda - \gamma$ 和 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线如图 1、图 2 中粗实线所示, 明显不符合上述粘性土 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线和 $\lambda - \gamma$ 曲线的变化规律。因此, 从粉质粘土与粉土互层土的动剪模量和阻尼比角度来看, 不能简单的把它作为粘性土处理。

图 1 场地 1 各土层土样的 $\lambda - \gamma$ 曲线Fig.1 The λ vs γ curves of soils in site No.1

3.2 场地 2

土体主要以粉砂与粉细砂为主, 随着深度的变化, 密实度由松散到密实逐步变化, 从试验得到的曲线 (图 3、4) 可以看出: 随着砂性土的密实度变大, $\lambda - \gamma$ 曲线越高, 而 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线越低。场地 2 中的粉土与粉砂互层土的 $\lambda - \gamma$ 和 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线如图 3、图 4 中粗实线所示, 也不符合上述砂性土 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线和 $\lambda - \gamma$ 曲线的变化规律。因此,

从粉质粘土与粉土互层土的动剪模量和阻尼比角度来看, 不能简单的把它作为砂性土处理。

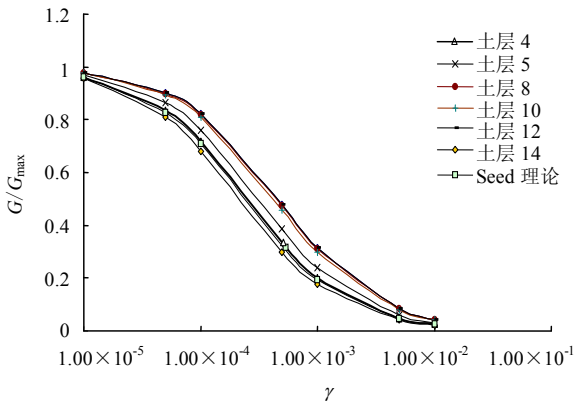


图2 场地1各土层土样的 $G/G_{\max}$ - γ 曲线
Fig.2 The $G/G_{\max}$ vs γ curves of soils in site No.1

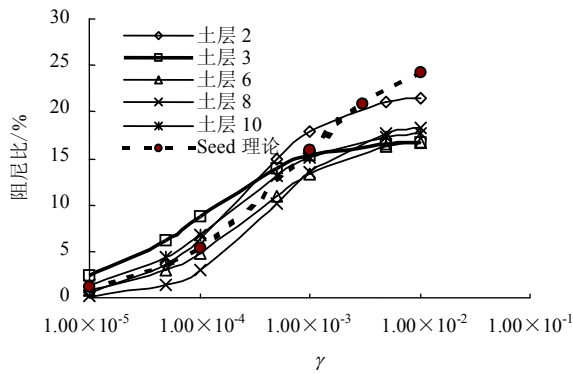


图3 场地2各土层土样的 λ - γ 曲线
Fig.3 The λ vs γ curves of soils in site No.2

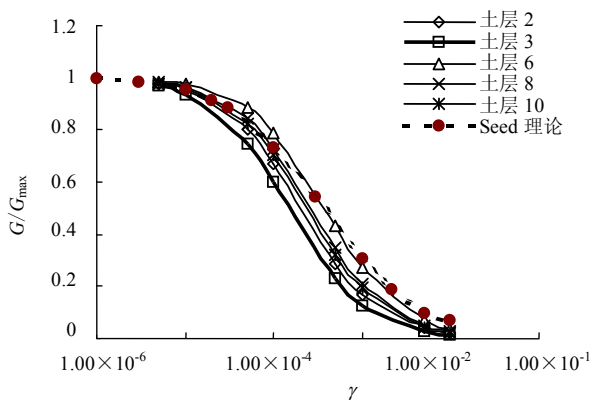


图4 场地2各土层土样的 $G/G_{\max}$ - γ 曲线
Fig.4 The $G/G_{\max}$ vs γ curves of soils in site No.2

4 场地地震反应计算结果与分析

4.1 场地地震反应的计算

对两个场地进行了地震反应分析, 输入地震动采用美国 Northridge 地震中记录的 Loma Prieta 加速度记录, 该记录的峰值加速度为 112.8 cm/s^2 , 计算场

地 1 时把峰值加速度调整为 0.56 m/s^2 和 1.13 m/s^2 ; 计算场地 2 时把峰值加速度分别调整为 0.56 m/s^2 和 1.0 m/s^2 , Loma Prieta 记录的原始加速度时程曲线和反应谱如图 5 所示。

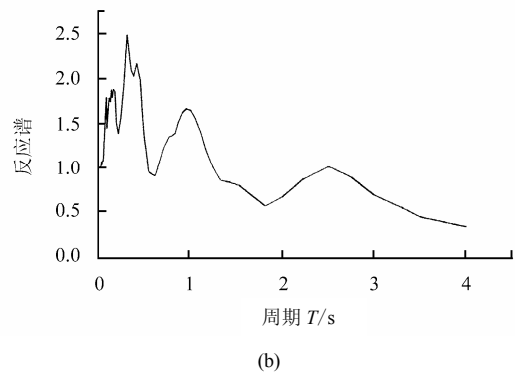
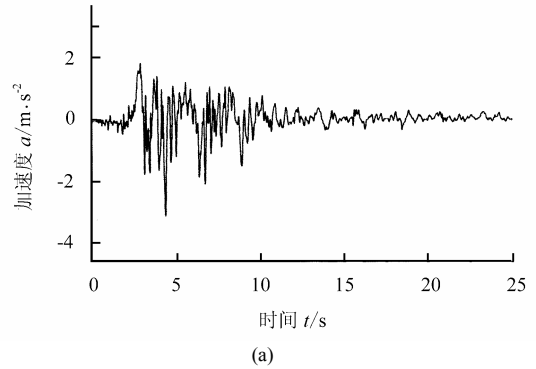


图5 Loma prieta 的加速度时程曲线和反应谱
Fig.5 Acceleration time-history and response spectra of Loma Earthquake

4.2 计算结果分析

根据图 6~9 给出的部分计算结果, 在基岩输入加速度较大时, 互层土的地震反应具有如下的特点:

(1) 互层土对地震波有滤波的作用, 尤其在强震时滤波效应特别明显。对于互层土埋深较大的场地 1, 该土层的层底峰值加速度与层顶峰值加速度之比为 2.18; 场地 2 的互层土层底峰值加速度与层顶峰值加速度之比为 1.34;

(2) 从剪应变与土层深度的关系曲线可以看出: 在互层土的位置出现了明显的突变, 在强震时这种突变尤为突出。场地 1 的互层土的最大剪应变达到 1.1%, 场地 2 的互层土的最大剪应变达到 1.4%, 在这个状态下土体已经接近或基本破坏。因此, 在强震时, 含有互层土的地基很容易失效;

(3) 场地 1 的地表最大加速度为 149 cm/s^2 , 场地 2 的地表最大加速度为 119 cm/s^2 , 这说明深厚软弱场地较之覆盖层厚度较薄的软弱场地具有更大的放大效应。

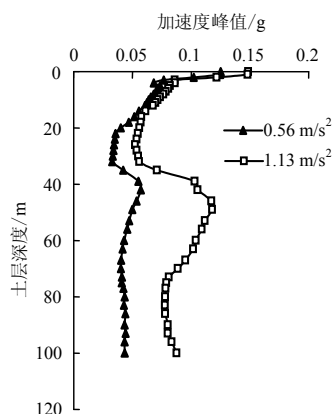


图6 场地1的土层加速度反应
Fig.6 Acceleration response of site No.1

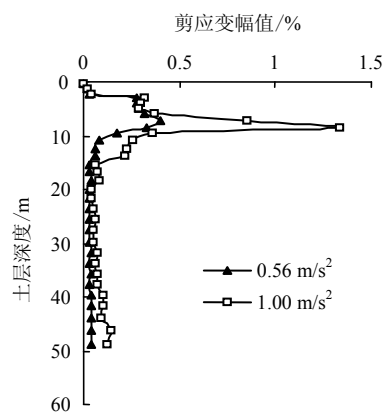


图9 场地2的土层剪应变反应
Fig.9 Shear strain response of site No.2

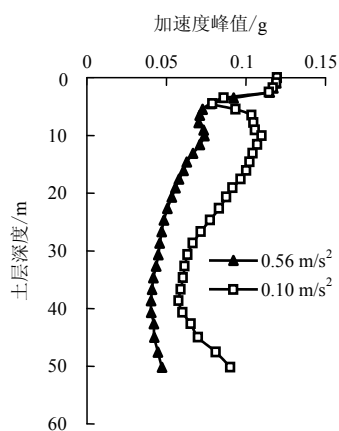


图7 场地2的土层加速度反应
Fig.7 Acceleration response of site No.2

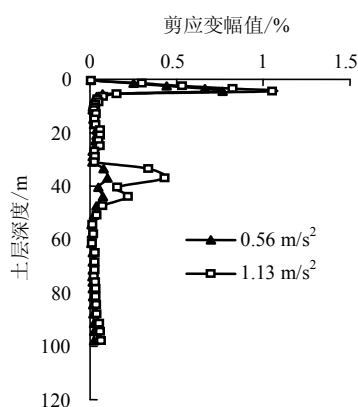


图8 场地1的土层剪应变反应
Fig.8 Shear strain response of site No.1

5 结 语

互层土具有滤波效应和剪应变剧变现象的主要原因在于其特殊的“千层饼”构造,它既不同于粘性土,也不同于砂性土,在互层土内不同性质土的薄层面上形成一个个明显的薄弱面。在强震时,薄层与薄层之间的粘结力很容易丧失,产生层间面的

相对滑动,因此认为互层土的阻尼明显大于一般性土体,使得互层土具有明显的滤波作用,同时产生很大的剪应变。

参 考 文 献

- [1] 刘雪珠, 陈国兴, 胡庆兴. 南京地区新近沉积土的动剪模量和阻尼比的初步研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 127—131.
LIU Xue-zhu, CHEN Guo-xing, HU Qing-xing. Primary study on dynamic shear modulus and damping ratio of recently deposited soil in area of Nanjing[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, 22(5): 127—131.
- [2] 陈国兴, 杨伟林. 南京河西地区软土地场地设计地震动参数研究[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(1): 35—40.
CHEN Guo-xing, YANG Wei-lin. Study of design ground motion parameters in hexi area of nanjing city[J]. **Journal of Nanjing University Technology**, 2002, 24(1): 35—40.
- [3] 陈国兴, 杨伟林, 严新育, 等. 南京河西地区设计地震动研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(3): 17—25.
CHEN Guo-xing, YANG Wei-lin, YAN Xin-yu. A study of design ground motion parameters in Hexi area of Nanjing city[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1999, 19(3): 17—25.
- [4] 杨伟林, 陈国兴, 严新育. 软土地基深开挖对场地设计地震动影响[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(3): 93—99.
YANG Wei-lin, CHEN Guo-xing, YAN Xinyu. Study of influence of deep level excavation on design ground motion parameters in a weak foundation site[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 20(3): 93—99.
- [5] 陈国兴, 朱定华, 何启智. GZZ-1 型自振柱试验机研制与性能试验[J]. 地震工程与工程震动, 2003, 23(1): 110—114.
CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua, HE Qi-zhi. Development and property test of GZZ-1 free vibration column test system[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2003, 23(1): 110—114.
- [6] Seed H B, Idriss I M. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses[R]. Calif: EERC, Report No.0-10, U.C.Berkely.