

土与地下结构动力相互作用的大型振动台试验与计算*

徐志英 施善云**

(河海大学农水系, 南京, 210024)

文 摘 本文首先用大型振动台进行了土-地下结构的动力相互作用试验。采用加重乳胶制成的方形管道作为地下结构, 将它预埋在大型刚性容器内的填砂中, 该容器装置在振动台上, 用简谐波在垂直于结构轴线的方向振动。测定了地下结构内的动应力以及砂与地下结构接触面上的动土压力及加速度。在这种试验的基础上提出了土-地下结构动力相互作用的计算模型。用等参数有限元法对这个小结构系统进行动力分析。结果证明, 当考虑土的静、动力非线性并在两介质间使用薄层单元时, 计算结果与试验结果吻合较好。

1. 引言

土体内常有预埋的地下结构, 如土坝和尾矿坝内有泄水洞, 土体内的交通隧道等。这些地下结构除了受到周围介质作用的静荷载外, 不可避免地还受到地震动土压力的作用。在设计地下结构时, 过去传统的方法是将土和结构看作两个独立体系, 把它们之间界面上的静、动力相互作用当作是以一定规律分布的外荷载来考虑。实际上土与地下结构在外力作用下的反应不仅决定于各自的性状, 而且还与它们之间界面上的变形协调以及相互传递的作用力和反作用力有关。因此不能把土和结构看作两个互不关联的独立体系, 应将它们当作一个综合体系, 以考虑它们间的相互影响或者它们间的相互作用。

关于地面结构与地基的动力相互作用问题, 目前已发表过不少文献^[1-4], 但关于土与地下结构的动力相互作用, 迄今尚少资料。本文首先提出通过大型振动台上的小结构振动试验, 探求地下结构的动力反应, 然后采用动力有限元法为基础的分析方法, 对小结构系统进行计算, 不断改善计算模式, 以便应用于具体地下结构系统的动力相互作用分析。

2. 小结构动力试验

2.1 试验布置

采用断面为24cm×24cm的正方形管道作为地下结构。管道用加重乳胶铁粉材料通过木

*高等学校博士学科点专项科研基金资助项目。

**参加试验的有: 孙一清、江泉、陆中玉、孙义明。

到稿日期: 1992-03-11。

模浇筑而成，管道长120cm。壁厚2.5cm。在埋入砂中之前，管道上粘贴了压力盒、加速度计及应变片，见图1。试验时，将管道横向埋在振动台试验槽中部。为减少槽壁的摩擦力，槽壁与管道端部间涂以润滑剂。槽中砂层总厚度为85cm，管道以下的砂层厚度为35cm，管道上方的砂层厚度为26cm。为了测定试验管道的材料的动力特性，在加工管道同时加工了悬臂梁试件(50cm×5cm×6cm)，作了试验。

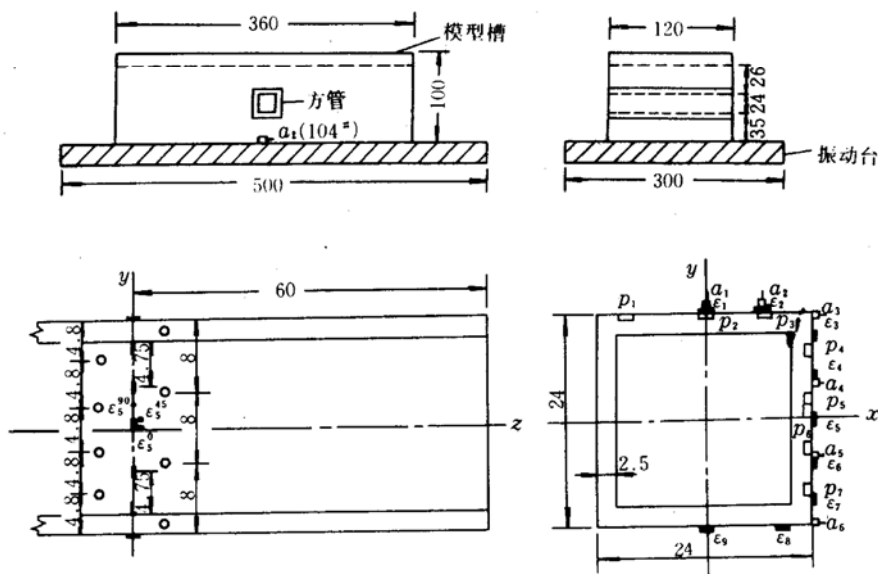


图1 试验槽及管道测点布置(尺寸单位: cm)

2.2 测试方法

(1) 激振方法

将装有预埋方形管道的试验槽固定在3m×5m的大型振动台上,当振动台由两台同步起振机激振时,试验槽也随之水平振动。振动频率由调速马达控制,激振力大小由起振机上偏心块质量调节。振动台激振范围为0.5~25Hz。台面振动及其加速度由一压电晶体加速度计监测。

(2) 测量仪器

a) 动土压力盒。为测定管道上的动土压力分布,采用自制的动土压力盒^[5]。本研究中所用压力盒的灵敏度标定值见表1。

表1 动土压力灵敏度标定值

压力盒编号	1#	2#	3#	4#	5#	7#	8#
测点编号	p_4	p_3	p_1	p_7	p_2	p_5	p_6
标定值(Pa/ $\mu\epsilon$)	35.0	100.0	82.0	125.0	50.0	263	454

b) 压电晶体加速度计。为了测定管道上振动加速度的分布规律,采用压电晶体加速度计,其灵敏度标定值如表2所示。

表2

压电晶体加速度计灵敏度标定值

加速度计编号	66 [#]	5 [#]	163 [#]	4 [#]	3 [#]	101 [#]	104 [#]
测点编号	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
标定值($P_c/(m/s^2)$)	2.00	1.95	1.72	1.72	1.67	1.72	1.80

注: a_i 为振动台台面加速度

c)应变片。试验中采用单向应变片,用甲乙胶粘贴在管道上。为了补偿,在加重乳胶试件上粘贴同型号不受力应变片。试验时,将该试件置于砂中并与试验槽处于同样的环境下。

(3) 试验测量框图

试验测量过程如图2所示

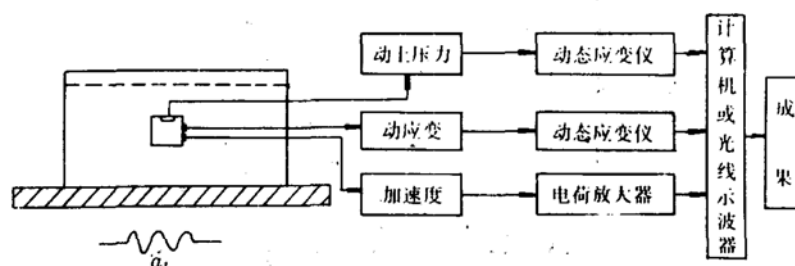


图2 试验测量框图

(4) 材料参数

试验槽中填砂采用福建平潭的标准砂。试验前用高加速度加以振密。加重乳胶材料采用低弹性模量配方,以保证量测的精度。经试验,有关材料的参数见表3。

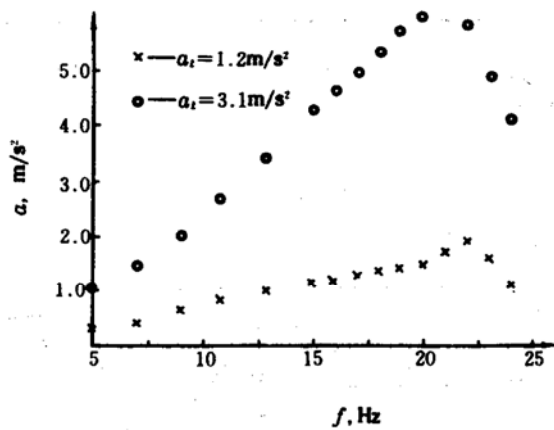
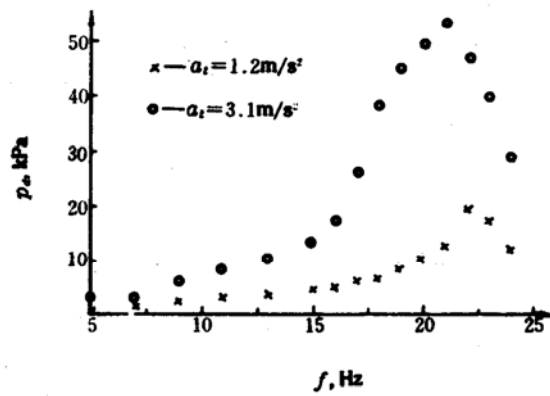
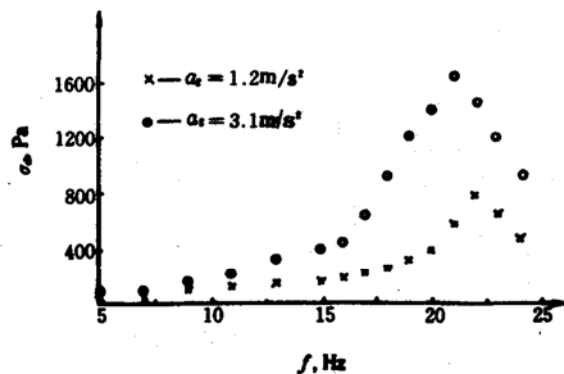
表3

材料参数

参数	重度 γ (kN/m^3)	凝聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ ($^\circ$)	模量系数 K	模量指数 n	破坏比 R_f	最大剪模系数 k_{zmax}	最大阻尼比 λ_{max} (%)	动弹性模量 E_d (MPa)	动泊松比 μ_d
填砂	16	0	38	300	0.5	0.9	40	30	—	0.3
加重乳胶	24	—	—	—	—	—	—	—	526.9	0.17

(5) 试验结果

试验表明,管道上的加速度、动土压力及动应力随着振动台频率的变化而变化的。作为一例,图3、图4和图5分别给出了加速度 a_3 、动土压力 p_d 和动应力(应变) ϵ_s 随振动台振动频率的变化规律。此外,振动台加速度不同,这些变化规律也不同。本研究采用了多种组合的台面加速度与频率进行试验和测定。图6、图7及图8的实线给出了当振动频率为22Hz、台面加速度 a_i 为 $1.2m/s^2$ 时的试验结果。

图3 a_s 随振动台振动频率的变化规律图4 p_s 随振动台振动频率的变化规律图5 ϵ_s 随振动台振动频率的变化规律

3. 小结构动力分析计算

3.1 计算假设与计算方法

- (1) 假设埋入的管道无端部影响, 可作为平面应变问题考虑;
- (2) 假定振动台台面是绝对刚性的, 试验槽底面不变形。

采用等参数有限单元法对填砂和管道(小结构)进行静、动力分析, 将它们作为一个综合体进行划分单元。在管道与砂的接触面处作两种情况考虑: ①接触面处设置薄层单元^[6]; ②不设置薄层单元。薄层单元完全等同于矩形单元, 只是单元很薄。当薄层单元的厚度与单元的长度之比限制在0.1~0.01之间时, 对接触面有较好的模拟。在计算中, 将加重乳胶看作为线弹性体, 对填砂考虑其静、动力非线性性质。

3.2 填砂料的静应力应变关系

填砂的应力应变关系是非线性的, 近似双曲线关系, 计算中采用J.M.Duncan等关于弹性模量的公式^[7]。

对于切线模量 E_t

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2 c \cos \varphi + 2 \sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (1)$$

对于割线模量 E_s , 根据简单推导, 只需将上式方括号右上角的“2”去掉即得。

上式中 σ_1 和 σ_3 为大、小主应力; R_f 为破坏比; c 为土的有效凝聚力; φ 为土的有效内摩擦角; K 和 n 为土的模量系数和模量指数。填砂的这些参数值见表3。 p_a 为大气压力。

3.3 填砂的动应力应变关系

加重乳胶材料的动力参数为动弹性模量和动泊松比。填砂的两个参数是动剪切模量 G 和阻尼比 λ ,这两个参数都随着动剪应变幅度而变,可用B.O.Hardin等的经验公式⁸计算

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \gamma_h}, \quad \lambda = \lambda_{\max} \frac{\gamma_h}{1 + \gamma_h} \quad (2)$$

$$G_{\max} = 6920 k_{2\max} (\sigma'_m)^{\frac{1}{2}} \quad (Pa)$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_r} \left[1 + a \exp \left(-b \frac{\gamma}{\gamma_r} \right) \right]$$

式中: γ 为动剪应变幅度; $\gamma_r = \tau_{\max}/G_{\max}$,称为参考剪应变, $\tau_{\max}$ 为最大剪应力; $k_{2\max}$ 为最大剪模系数; $\lambda_{\max}$ 为最大阻尼比(见表3); a 和 b 为系数,与动荷载次数及频率有关,由专门表格查取。

3.4 动力方程及其求解

采用动力有限元法进行动力分析。对填砂及管道进行离散化以后,动力方程可以写为

$$[M]\ddot{\delta} + [C]\dot{\delta} + [K]\delta = F(t) \quad (3)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为整体质量矩阵、整体阻尼矩阵、整体劲度矩阵; $F(t)$ 为结点动荷载; t 为时间; δ , $\dot{\delta}$, $\ddot{\delta}$ 分别是结点对于振动台台面的位移、速度、加速度。

方程式(3)的求解采用威尔逊线性加速度法,逐步积分。计算步骤大致如下:

- (1)用静力有限元法求出振动体系(填砂及管道)的初始静应力。
- (2)假定各单元的动模量及阻尼比初值,形成劲度矩阵、阻尼矩阵及质量矩阵。
- (3)用威尔逊法进行逐步积分,算出结点位移及各单元的应变过程及应力过程。

(4)找出各单元剪应变的峰值,取其0.65倍作为平均值,即 γ ,代回公式(2)计算新的动模量及新的阻尼比。如果它们与初值相差大于10%,则回到第2步计算,直到收敛为止。根据这时的应力,即可获得小结构的动应力以及界面上的动土压力(即填砂与管道的动力相互作用力)。

3.5 计算结果

图9示出计算采用的单元划分,共分359个结点,312个单元,接触界面上44个薄层单元。采用正弦波输入,其峰值加速度和频率均与试验中相同,即加速度为1.2m/s²,频率为22Hz,振动历时5s。计算出的最大加速度、最大动土压力以及管道结构内(靠近外壁处)的最大动应力分布分别示于图6, 7, 8。图中的虚线表示在填砂与管道界面上设置薄层单元的计算结果,点划线表示不设置薄层单元的计算结果。两种结果从定性上看与小结构动力试验的结果基本一致,尤以设置薄层单元的情况一致性更好。因此建议在计算实际的地下结构时采用界面薄层单元。

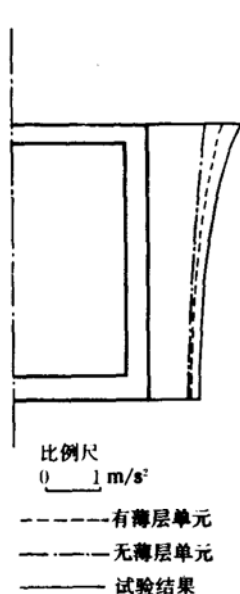


图6 管道侧壁面的最大加速度分布

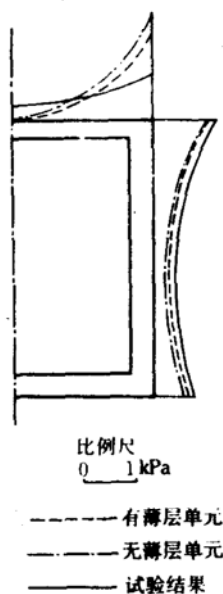


图7 管道界面上的最大法向动土压力分布

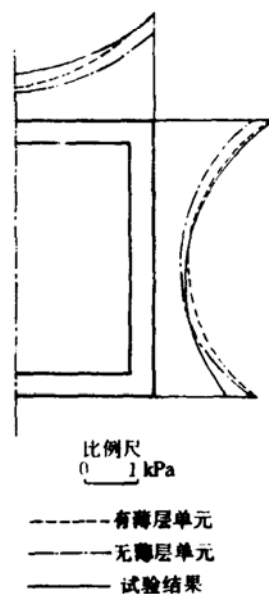


图8 管道(靠近外壁处)结构内的最大动应力分布(顶板的应力为 σ_x ,侧墙的应力为 σ_y)

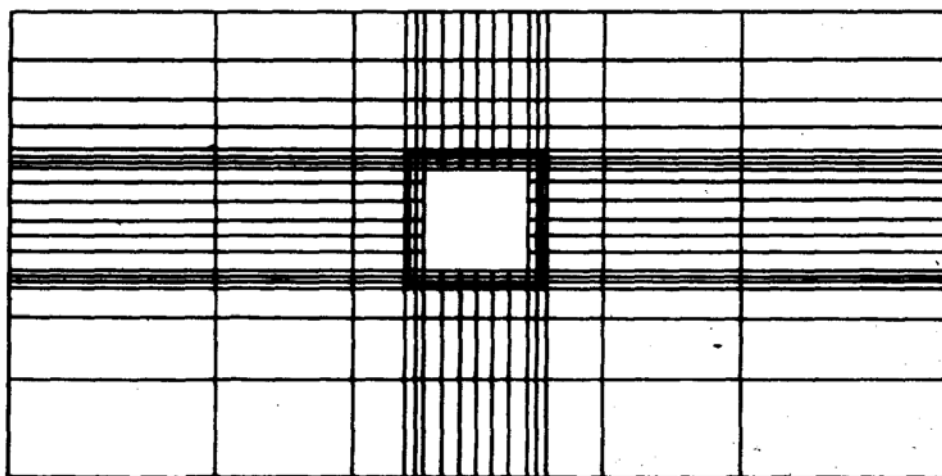


图9 小结构系统的有限单元划分图

4. 结 语

(1) 目前, 由于土的复杂性和特殊性, 土工模型试验尚难进行, 土与地下结构动力相互作用的问题更难用模型试验的相似律加以解决。在这种情况下, 为了解决问题, 找出动力反应的规律, 在大型振动台上做小结构试验的这条途径是可取的。试验结果与计算方法互相配合可以验证所采用的计算模式和计算方法的正确程度, 从而不断改善模式和方法。

(2) 从计算结果与试验结果的比较可认为, 本文提出的用动力有限元方法(考虑土的静、动力非线性性质)并在两种介质接触面上设置薄层单元的方法, 可以用来近似计算预埋地下

结构与土共同作用的问题及有关反应量。

参 考 文 献

1. Wong H L, Luco J E, Trifunac M D. Contact Stresses and Ground Motion Generted by Soil-Structure Interaction. *Earthq Engrg and Struct Dyn*, 1977, 5: 67~69.
2. Wong H L, Luco J E. Dynamic Interaction between Rigid Foundation in Layered Half-Space. *Soil Dyn Earthq Engrg*, 1986, (5): 149~158.
3. Wolf J P. Nonlinear Soil-Structure Interaction Analysis Based on Hybrid Frequency-Time-Domain Formulation. *Proc of the 8 ECEE, Lisbon*, 1986.
4. Seed H B, Lysmer J, Hwang R. Soil-Structure Interaction Analyses for Seismic Response. *ASCE*, 1975, 101 (GT5): 439~457.
5. 王云球, 孙一清, 施善云. 小型静动两用双层薄膜压力盒的研制. *河海大学学报*, 1987 (5): 94~100.
6. Desai C S, Zaman M M. Thin-Layer Element for Interface and Joints. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1984, 8 (1): 19~25.
7. Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear of Stress and Strain in Soil. *Proc ASCE*, 1970, 96 (SM5): 1624~1653.
8. Hardin B O, Drnevich V P. Shear Modulus and Damping in Soil: Design Equations and Curves. *Proc ASCE*, 1972, 98 (SM7): 667~692.

Large-Sized Shaking Table Test and Calculation for Soil-Substructure Dynamic Interaction

Xu Zhi-ying Shi Shan-yun

(Hohai University, Nanjing)

Abstract

Soil-substructure dynamic interaction was studied by large-sized shaking table test. A square pipe made of accentual emulsion was chosen as a substructure model and was buried in sand inside a large-sized rigid container, installed on the shaking table. The model was shaken with simple harmonic wave in the direction perpendicular to the substructure axis. The dynamic stresses in substructure and dynamic earth pressures and accelerations on interface between sand and substructure were measured. Based upon the test results a calculation modeling the soil-substructure dynamic interaction was carried out. The dynamic analysis of this small substructure system was made by FEM with quadrilateral isoparametric elements. The results obtained indicated that when static and dynamic nonlinear behaviors are taken into account and thin-layer elements are used in the interface between two media, the calculated results are in fairly good agreement with test results.