

文章编号: 1000-4750(2002)06-093-06

成层地基与浅埋结构物动力相互作用的简化分析

张 嘎, 张建民

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 基于任意侧向位移下挡土墙地震土压力理论, 建立了新的地基-浅埋式结构物相互作用力与其相对位移之间的关系, 并对该关系加以推广, 应用到成层地基及深基础情形。提出了一种实用的求解成层地基-浅埋式结构物动力相互作用的简化质-阻-弹模型, 该方法概念简单合理, 参数确定简便, 不需迭代, 计算量小, 可适用于以下情形: 1) 结构物可视为粘弹性介质; 2) 地基和浅埋式结构物可简化为一维运动; 3) 结构物运动对土体运动的影响忽略不计。

关键词: 动力相互作用; 接触面; 地震; 质-阻-弹模型

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A

确定动力条件下土-结构相互作用力与其相对位移之间的关系, 是土-结构动力相互作用分析的主要课题之一。目前在理论、试验等方面已对这一课题进行了大量研究, 并已提出了很多种型的描述土-结构接触面力学特性的接触面单元, 但到目前为止尚未较好的模拟接触面的力学特性^[1]。本文针对浅埋式结构物, 将张建民等提出的任意侧向位移下挡土墙地震土压力理论^[2,3]加以扩展, 以确定地基-浅埋式结构物相互作用力与其相对位移之间的关系。同时还发现在一定条件下, 一点处的土-结构相互作用力与其相对位移近似成线性关系, 并进一步将这一关系扩展应用到粘性土地基以及成层地基, 从而得到了土体与结构物接触面力学特性的简化描述。

浅埋于成层地基中的地下结构物在实际中较为常见, 其动力相互作用的计算方法目前主要有解析方法和数值方法两类。解析方法的应用有严格的限定, 目前只得到了整个求解区域内土-结构动力相互作用系数是常数条件下的解析解^[4,5]。与解析解相比, 基于结构动力学的质点-阻尼-弹簧模型(以下简称质-阻-弹模型)能突出反映动力反应分析中最根本的质量、弹性和阻尼这三个因素, 物理概念明确, 适用范围较广, 且该类模型与有限元等复杂的数值

方法相比, 计算量要小得多, 参数易于确定, 便于实际应用。本文基于所建立的土体与结构物接触面简化本构关系, 提出了一种实用的求解成层地基-浅埋式结构物动力相互作用的简化质-阻-弹模型及方法, 该模型及方法概念简单合理, 不需迭代, 参数少且易于确定, 特别适用于一般地下结构物的土-结构动力相互作用分析。

1 动力相互作用系数

设一点处的土-结构相互作用力 p 与其相对位移 D 满足以下关系

$$p = kD \quad (1)$$

式中 k 称为动力相互作用系数。

由于结构一侧受主动侧的土压力作用时, 另一侧则受被动侧的土压力作用, 结构所受的偏差土压力 p 应为这两侧土压力水平分量之差, 根据张建民等提出的任意侧向位移下挡土墙地震土压力理论^[2,3], 针对图 3 所示坐标系, 对结构物在高程 y 处有

$$p = g(H - y)K_{ES} + g_y K_{ED}, \quad 0 \leq y \leq H \quad (2)$$

$$\begin{cases} K_{ES} = \cos i (K_{\text{left}} \cos \mathbf{d}_{\text{mob, left}} - K_{\text{right}} \cos \mathbf{d}_{\text{mob, right}}) \\ K_{ED} = (1 - \cos i) (K_{\text{left}} \cos \mathbf{d}_{\text{mob, left}} - K_{\text{right}} \cos \mathbf{d}_{\text{mob, right}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 H 是结构物埋深, g 是土体的平均容重,

收稿日期: 2001-04-11; 修改日期: 2001-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(59979012), 北京市自然科学基金重点项目(8011002)

作者简介: 张 嘎(1976), 男, 山东淄博人, 博士生, 从事岩土工程及土动力学研究

张建民(1960), 男, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程及土动力学研究

$d_{mob, left}$ 、 $d_{mob, right}$ 与 K_{left} 、 K_{right} 分别根据 $-D$ 和 D ，由文[2]中有关公式计算得到的作用于结构物左侧和右侧土压力的 d_{mob} 与 K_E 值(文[4]也给出了相关公式)。

将式(3)的 $K_{ES} \sim D$ 关系和 $K_{ED} \sim D$ 关系显式的表述为

$$K_{ES} = k_{ES} \cdot D, K_{ED} = k_{ED} \cdot D \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)，可得 i 点的动力相互作用系数

$$k_i = g(H - y_i)k_{ES} + g_i k_{ED} \quad (5)$$

从文[2]和式(3)可知 K_{ES} 和 K_{ED} 是土内摩擦角 j' ，结构物壁面摩擦角 j'_b ，水平地震加速度系数 k_h ， D/D_a 和 D_p/D_a (D_a 和 D_p 分别为达到主动土压力和被动土压力时的最小土体-结构相对位移的绝对值)的函数。取 $j'=40^\circ$ ， $j'_b=20^\circ$ ， $k_h=0.2$ 和 $D_p/D_a=10$ ，以 D/D_a 为自变量， K_{ES} 和 K_{ED} 为因变量作图，并用直线如图 1 所示进行拟合。在 $D_p/D_a=10$ 且不同的 j' 、 j'_b 、 k_h 情况下对 D/D_a 与 K_{ES} 关系及 D/D_a 与 K_{ED} 关系进行拟合的部分结果示于表 1。图 2 给出了 $j'=40^\circ$ ， $j'_b=20^\circ$ ， $k_h=0.3$ ，但 D_p/D_a 不同情况下对 D/D_a 与 K_{ES} 关系及 D/D_a 与 K_{ED} 关系进行拟合的结果。从图 1、2 和表 1 中可以看出，当地基-结构的相对位移较小时($D \leq 5D_a$)，在 j' 、 j'_b 、 k_h 和 D_p/D_a 的一般取值范围内， D 和 K_{ES} 及 D 和 K_{ED} 线性关系较好。 K_{ES} 和 K_{ED} 与 D 之间存在近似线性关系的结论表明： k_{ES} 和 k_{ED} 在上述条件下可以近似视为与地基-结构的相对位移 D 无关的常数。这样，在分析地基-浅埋式结构物动力相互作用时，可按照文克尔地基模型计算。文[4]

表 1 $D_p/D_a = 10$ 时 K_{ES} 及 $K_{ED} \sim D$ 线性拟合结果

Table 1 Linear fit results of K_{ES} and K_{ED} with D when $D_p/D_a = 10$

$j'_b/(\circ)$	$j'/(\circ)$	k_h	K_{ES}	K_{ED}	相关系数R
20	40	0.2	0.691	0.013	0.998
		0.4	0.516	0.040	0.999
	50	0.2	1.253	0.017	0.980
		0.4	1.0371	0.055	0.980
30	40	0.2	0.813	0.016	0.986
		0.4	0.611	0.047	0.985
	50	0.2	1.612	0.319	0.951
		0.4	1.323	0.102	0.952

还给出了基于张建民等提出的任意侧向位移下挡土墙地震土压力理论确定该系数的方法。

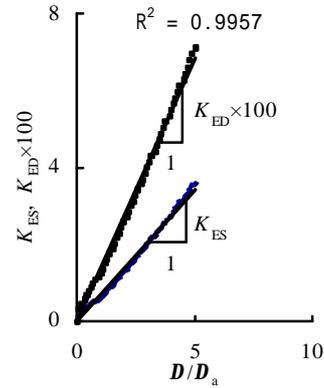


图 1 $K_{ES} \sim D/D_a$ 和 $K_{ED} \sim D/D_a$ 拟合曲线

Fig.1 Curve fitting of K_{ES} vs D/D_a and K_{ED} vs D/D_a

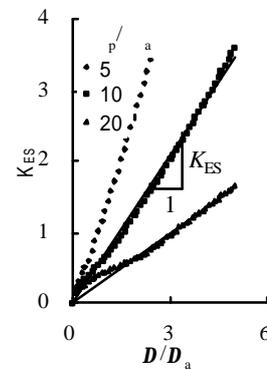


图 2 $j'=40^\circ, j'_b=20^\circ, k_h=0.2$ 时 $K_{ES} \sim D/D_a$ 拟合曲线

Fig.2 Curve fitting of K_{ES} vs D/D_a when $j'=40^\circ, j'_b=20^\circ, k_h=0.2$

动力相互作用系数 k 与土-结构相对位移 D 无关这一结论可以进一步推广到一般的成层地基，以及不适用土压力公式的深基础(如桩基础)等情形，不过此时可能需要通过试验或其它经验公式(如 $p-y$ 试验曲线)等方法来确定各点的动力相互作用系数。

得到土-结构相互作用力与相对位移关系后，可采用解析方法或数值方法来进行地基-浅埋式结构物动力相互作用分析，文献[4]、[5]已经提出了一种解析方法。由于质-阻-弹模型具有概念简单而且适用范围较广的特性，本文提出了一种实用的求解成层地基-浅埋式结构物动力相互作用的简化质-阻-弹模型及方法。

2 质-阻-弹模型

2.1 控制方程

针对如图 3 所示的水平成层地基与浅埋式结构物系统，本文引入如下基本假设：(1) 结构物为粘

弹性介质；(2) 地震波为水平上传播的剪切波；(3) 结构物抗弯刚度很大，其转角可忽略不计，只发生水平方向的位移；(4) 结构物底端固结在基岩(土层)上；(5) 由于地基属半无限体，其运动相对于结构物而言是场的概念，因此作为简化分析，结构物运动对土体运动的影响忽略不计。

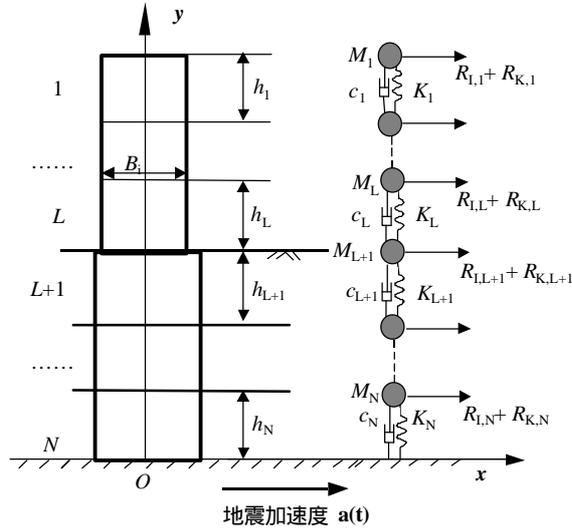


图3 浅埋式结构物及简化质-阻-弹分析模型

Fig. 3 Semi-buried structure and simplified mass-damping-spring model

根据以上基本假设，对于输入的地震加速度 $a(t)$ ，以基岩(或固结土层)为参考系，可得到如图3所示的分析结构物动力响应的质-阻-弹模型。该模型将结构物按照土层及自身性质变化以及计算精度分层，并将每层结构物的质量分别集中到该层的界面上，各质点间或质点与基岩(固结土层)间用假想的无重量的弹簧和阻尼器连接起来以分别反映系统的弹性和阻尼性质。根据力的等效原理将结构物受到的连续分布荷载(在基岩参考系中，质点系所受的外力有惯性力和土体对结构物的作用力)转化为集中力系作用在各个质点上。从而将土-结构物相互作用问题转化为求解该质点系动力响应的结构动力学问题，其动力平衡方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [D]\{u\} = \{R_I\} + \{R_K\} \quad (6)$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵，是对角矩阵； $[D]$ 为刚度矩阵； $[C]$ 为阻尼矩阵，本文使用瑞利阻尼； $\{u\}$ 和 $\{v\}$ 分别是结构物和土体质点系的位移列向量； $\{R_I\}$ 和 $\{R_K\}$ 分别是惯性力和土体作用力荷载列向量。可分别表述为

$$[M] = \text{diag}(M_1 \ \dots \ M_n) \quad (7)$$

$$[C] = a[M] + b[D] \quad (8)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} d_1 & -d_1 & & & & \\ -d_1 & d_1 + d_2 & -d_2 & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & -d_{n-2} & d_{n-2} + d_{n-1} & -d_{n-1} \\ & & & & -d_{n-1} & d_{n-1} + d_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$a = I/w, \quad b = I \cdot w$$

$$\{u\} = (u_1 \ \dots \ u_n)^T, \quad \{v\} = (v_1 \ \dots \ v_n)^T \quad (10)$$

$$\{R_I\} = (R_{I,1} \ \dots \ R_{I,n})^T, \quad \{R_K\} = (R_{K,1} \ \dots \ R_{K,n})^T$$

式中 I 是阻尼比， w 是结构物的固有频率，可根据结构动力学方法计算得出。

有初始条件

$$\begin{aligned} t = 0: \quad \{u\} &= \{\dot{u}\} = 0 \\ t = 0: \quad \{\ddot{u}\} &= \text{diag}(-a(0), \dots, -a(0)) \end{aligned} \quad (11)$$

若设土体为粘弹性介质，并将动力平衡方程(6)中土体作用力列向量 $\{R_K\}$ 取为 0，同时将结构物的有关参数用土体的对应参数代替，将截面积均取为单位面积，则可得到土体在地震荷载作用下的动力平衡方程，解之可求得土体的动力响应。

2.2 模型参数

在垂直运动方向(z 方向)上取一单位长度，质点质量 M_i 可由下式确定

$$M_i = \begin{cases} r_1 h_1 B_i / 2 & i = 1 \\ (r_{i-1} h_{i-1} B_{i-1} + r_i h_i B_i) / 2 & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (12)$$

质点间的弹簧刚度系数 d_i 的确定以满足剪切变形为准，由下式确定

$$d_i = B_i \cdot G_i / h_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

式中 M_i 是第 i 层结构物的质量， r_i 是第 i 层结构物的表观平均密度， h_i 是第 i 层结构物的厚度， B_i 是结构物第 i 层运动方向(x 方向)的长度， G_i 是第 i 层结构物的剪切模量。

惯性力荷载列向量可由下式计算得出

$$R_{I,i} = -M_i \cdot a(t) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

设结构物所受的土体作用力在每一层均沿深度成线性分布，根据静力等效将该分布力集中到质点上，可得土体作用力荷载列向量中元素的表达式

$$R_{K,i} = \begin{cases} 0 & i = 1, \dots, L \\ h_{L+1} (\bar{p}_{L+1} / 3 + \bar{p}_{L+2} / 6) & i = L+1 \\ h_{i-1} (\bar{p}_{i-1} / 6 + \bar{p}_i / 3) & i = L+2, \dots, N-1 \\ h_i (\bar{p}_i / 3 + \bar{p}_{i+1} / 6) & \\ h_{N-1} (\bar{p}_{N-1} / 6 + \bar{p}_N / 3) & i = N \\ h_N \bar{p}_N / 3 & \end{cases} \quad (15)$$

由式(1)

$$\bar{p}_i = k_i D_i = k(u_i - v_i) \quad (16)$$

2.3 求解方法

由于在荷载列向量中包含有位移列向量，因此结构物质点系的动力平衡方程组是非线性的，需要使用迭代的方法求解。但是，当动力相互作用系数与地基-结构物相对位移无关时，该方程组就退化为线性方程组，不仅大大提高了计算速度，而且避免了迭代收敛性问题。使用 Newmark 法求解动力平衡方程(6)，最后形成的线性方程组系数矩阵是三对角阵，可使用追赶法求解，这又使得计算量大为节省。

还需指出，在对结构物进行动力反应分析计算时，需先使用本文方法(或其它方法)求得土体的位移，作为已知条件输入。

2.4 应用步骤

本文所提出方法的具体计算步骤为：(1)由式(7)-(9)计算出结构物质点系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；(2)由式(14)求得 t 时刻惯性力荷载列向量，并根据已知的 t 时刻土体位移由式(15)求得土体作用力荷载列向量；(3)根据 $(t - \Delta t)$ 时刻的结构物质点系的运动学量(位移、速度和加速度)及荷载列向量结果用 Newmark 法求解 t 时刻结构物质点系的动力学方程组，得到 t 时刻结构物质点系的运动学量，并可根据式(16)计算出结构物所受的动土压力差；(4)重复(2)~(3)步，计算下一时刻结构物质点系的运动学量，直至计算终止时刻。

3 应用及比较

为了验证动力相互作用系数与土-结构相对位移无关这一论断的有效性，本文使用质-阻-弹模型，针对考虑和不考虑土-结构相互作用力与其相对位移关系非线性这两种情况，分别对下面一个理想化算例进行了计算分析。其中考虑非线性时土作用力荷载列向量采用式(2)确定，不考虑非线性时动力相互作用系数由文[4]方法确定。结构物高 4 m，其顶面与地表平齐，底端固结在基岩上；其壁面摩擦角 $j_b = 20^\circ$ ，单宽表观密度 $r_i B_i = 2.5t/m^2$ ，单宽剪切刚度 $G_i B_i = 10^7 kN/m$ ，阻尼比为 0.1，达到主动土压力和被动土压力时的地基-结构的相对位移值 D_a 和 D_p 分别取 0.004 m (1‰H)和 0.04 m (1% H)。地基土密度为 $1.5 g/cm^3$ ，剪切模量为 5.0 MPa，阻尼比为 0.2，内摩擦角为 40° 。输入基岩加速度如图 4 所示。

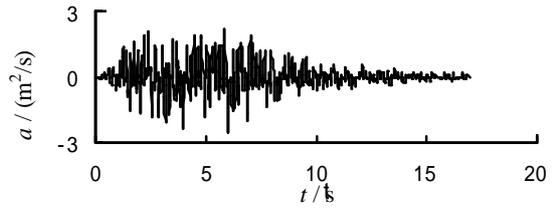


图 4 地震过程中输入基岩的地震加速度

Fig. 4 Acceleration history for calculation

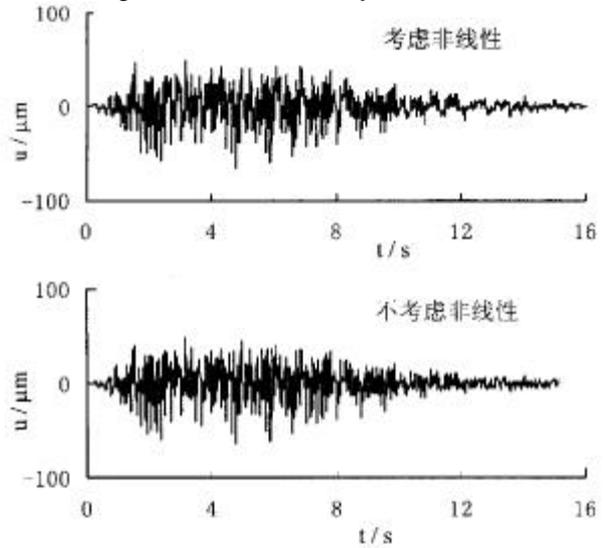
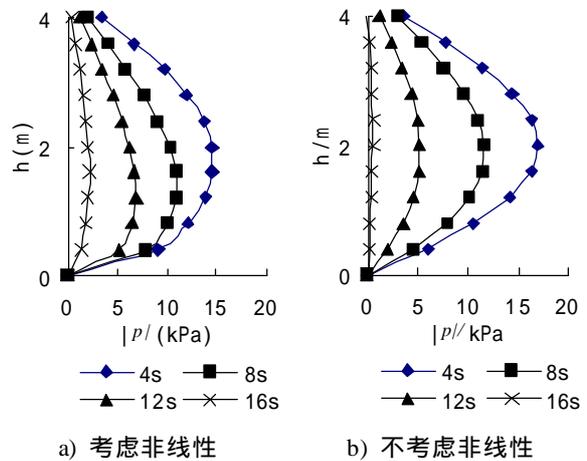


图 5 计算出的结构物顶点相对于基岩位移时程曲线

Fig.5 Response displacement history on top of structure



a) Nonlinearity assumption b) Linearity assumption

图 6 计算出的结构物所受动土压力差沿高程分布图

Fig.6 Dynamic earth pressure distribution vs height of structure

图 5 和图 6 分别给出了考虑土-结构相互作用力与其相对位移非线性和不考虑该非线性时，计算出的结构物顶点相对于基岩位移的时程曲线以及结构物所受动土压力差在不同时刻沿高程的分布图。从图中可以看出，认为土-结构相互作用力与其相对位移成线性关系，对结构物的位移响应影响很小，对动土压力差的数值和分布影响稍大，但对于

一般的结构物动力分析该误差是可以接受的,从而再次说明动力相互作用系数与土-结构相对位移无关这一结论的合理性。

下面再给出一个采用线性模型分析成层地基与结构物动力相互作用的理想算例。地基为两层,其有关参数如表 2 所示,结构物参数及计算条件与上例相同,动力相互作用系数按照文[4]方法确定。

表 2 地基土的部分计算参数

Table 2 Parameters of soils for calculation

	密度/ g/cm ³	剪切模量 /MPa	阻尼比	内摩擦角/°
上层	1.5	3.0	0.2	30
下层	2.0	6.0	0.2	40

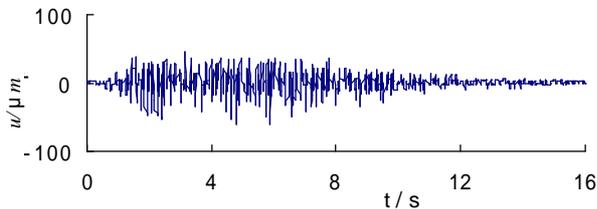


图 7 计算出的结构顶点相对于基岩位移时程曲线

Fig.7 Response displacement history on top of structure

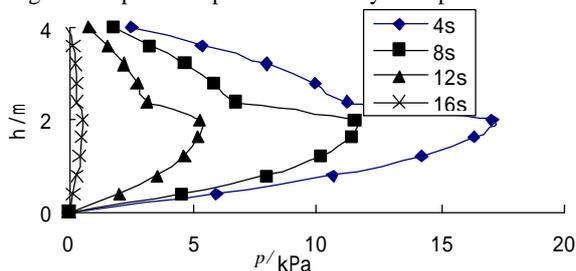


图 8 计算出的结构物所受动土压力差沿高程分布图

Fig.8 Dynamic earth pressure distribution with height of structure

图 7 和图 8 分别给出了计算出的结构顶点相对于基岩位移的时程曲线以及结构物所受动土压力差在不同时刻沿高程的分布图。从图 8 中可以看出,在两土层的交界面上,动土压力差发生了明显的转折,这主要是下层土内摩擦角与密度均比上层土大造成的。

4 结论

1、本文论证了对于成层地基,在土-结构相对位移较小的情况下($D \leq 5D_a$),结构物所受的土作用力与它们的相对位移近似成线性关系,这使得在评价地基-浅埋式结构物动力相互作用时,有关参数确定以及动力反应分析方法都得到简化。

2、本文提出了一种计算成层地基中结构物在地震荷载作用下一维动力反应的质-阻-弹计算模型及方法。该模型及方法简单合理,计算量小,参数确定方便,具有较强的实用性。

参考文献:

- [1] 宰金珉. 高层建筑地基与基础设计中的几个问题 [A]. 史佩栋, 高大钊, 钱力航编. 21 世纪高层建筑基础工程论文集, 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.7: 44-69.
Zai J M. Several problems in foundation design for high-rise buildings [A]. Shi P D, Gao D Z, Qian L H edited, Proceedings of high-rise buildings and foundation engineering in 21st century, Beijing: China Construction Press, 2000.7: 44-69.
- [2] Zhang J M, Shamoto Y, Tokimatsu K. Seismic earth pressure theory for retaining wall under and lateral displacement[J]. Soils and Foundations, 1998, 38 (2): 143-163.
- [3] Zhang J M, Shamoto Y, Tokimatsu K. Earth pressure against rigid walls during earthquakes[J]. ASCE Geotechnical Special Publication, 1998, 75: 1-14.
- [4] 张嘎, 张建民. 水平地基中结构物动力响应的一维解析方法[J]. 清华大学学报, 2001, (11): 106-109.
Zhang G, Zhang J M. Simplified evaluation for dynamic response of structures in soils[J]. Journal of Tsinghua University, 2001,(11): 106-109.
- [5] Zhang G, Zhang J M. Simplified evaluation for dynamic layered soils-structure interaction[A]. 4th Intern. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, USA., 2001.3.

ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF SANDWICH PLATE WITH CONSTRAINED LAYER DAMPING STRUCTURE

LIU Tian-xiong¹, HUA Hong-xing², SHI Yin-ming², CHEN Zhao-neng²

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100086; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: A new modeling method for a sandwich plate with viscoelastic material (VEM) layer is presented in this paper. It is difficult to process the dynamical analysis and control design by conventional methods because the constitutive relations of VEM are frequency and temperature dependent. As an example, the new modeling method, which combines the GHM (Golla-Hughes-Mctavish) method of VEM modeling and FEM (Finite Element method), is utilized to calculate the modal parameters of a cantilever sandwich plate with viscoelastic core. The results show that the new modeling method is more accurate and reliable than other methods and good agreement is reached in comparison with the test results and the simulation results of ANSYS5.5 and NASTRAIN70.7.

Key words: constrained layer damping plate; finite element method; dynamic characteristics; viscoelastic material

(上接 97 页)

SIMPLIFIED ANALYSIS OF DYNAMIC INTERACTION BETWEEN LAYERED SOILS AND SEMI-BURIED STRUCTURE

ZHANG Ga, ZHANG Jian-Min

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Based on the modification of a seismic earth pressure theory for retaining structures under any lateral displacements, new formulas are proposed to determine the relationship of lateral soil-wall displacement and corresponding earth pressures against the sidewalls of the structure during an earthquake. The formulas can be extended to layered soils and deep foundations. A simplified mass-damping-spring model with the formulas is presented for dynamic interaction between layered soils and semi-buried structure. The model is feasible because parameters are easily obtained and no iteration is needed. The model is effective under the following conditions: 1) The soils behave as a visco-elastic medium; 2) The structure and its surrounding soil layers are represented as a group of shear beams which displace in horizontal direction only; and 3) The soil's response is not affected by the structure's movement.

Key words: dynamic interaction; interface; earthquake; mass-damping-spring model