

# 地基半空间等效集总体系的比拟法与实测分析<sup>①</sup>

吴邦达, 吴丽波

(中国五洲工程设计集团有限公司, 北京 100053)

**摘要:**先略述莱斯默比拟法的形成;再由半空间理论等效为质弹体系,得出辐射阻尼比、刚度及参振土质量,并论述两体系的结合;最后经实测、分析和使用,考虑土体非匀质性折减阻尼比以作修正,使其更为实用。这有助于消除在我国长期认为阻尼比大而而不安全、不便使用的疑虑,以便推动半空间理论在我国的实用化。

**关键词:** 匀质半空间理论; 等效质弹体系; 辐射阻尼比; 匀质土阻尼比的修正

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-1029-008

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1029

## Analog Method for the Equivalent Lumped System of Foundation Half-space Theories and Associated Field Measurements

WU Bang-da, WU Li-bo

(China Wuzhou Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** In this study, the formulation of Lysmer's analog method is presented briefly first. The radiation damping ratio, stiffness, and vibrational mass for a certain amount of soil may be obtained from a half-space system that is equivalent to a mass-spring system. Subsequently, a combination of both systems is discussed. On the basis of measurement, analysis, and application, the damping ratio is reduced: this is a modification for modeling non-homogeneous soil and is more practical. For a long time, a larger damping ratio has been considered to be unsafe and thus not used; this constraint may disappear and subsequently the practical use of half-space theory will become more common. The focal point of this study is the practical use of the method. First, two experimental tests have revealed that the damping ratio of our state code is very small and the half-space is significantly larger. Therefore, the results from measuring a large number of vibrator foundations and models demonstrate that the damping ratio of the half-space must be modified. (1) The damping ratio of homogeneous soil must be reduced. Although some energy of wave propagation is consumed, wave reflection or refraction is performed by soil or hard layers. The energy consumed is less, and the damping ratio is not as large with a discount coefficient of 0.5~0.7. (2) The former Soviet code of 1979 used a reduction of 30% on the half-space damping ratio for the design of dynamic machine foundation, which is equal to the upper reduction limit of our measurement results. In 1996, a Russian academician who had been the chief editor of that code came to China to deliver lectures and explained that the reduction value was obtained from a large number of comparisons obtained by measuring. (3) The reduced damping ratio of homogeneous soil is practical. The reduced damping ratio is still greater than that of our state code and

① 收稿日期: 2014-08-20

作者简介: 吴邦达, 男, 教授级高级工程师, 主要从事建筑结构及动力基础设计。E-mail: wubangda@sina.com。

will be both more economical and safer for the design of dynamic foundations.

**Key words:** homogeneous half-space theory; equivalent mass-spring system; radiation damping ratio; modifying of homogeneous soil's damping ratio

## 0 引言

动力基础半空间理论早在国外流行,但在我国长期处于研究状态,少见使用,原因在于其阻尼比很大,认为不安全。本文先略作推导,说明辐射阻尼来源、地基刚度和参振土质量的形成。通过测试分析以及工程基础的长期使用,说明辐射阻尼可用,但要从实用性出发,考虑土体非匀质性,进行折减以作修正。目前分析方法不一,本文只论述较为流行的莱斯默比拟法,且只考虑竖向。

## 1 比拟法形成简述

动力地基半空间理论首先假设地基土体为匀质、各向同性、线性的弹性半无限体,基础是置于土体表面上的刚体,然后分析振动基础与地基土体的相互作用。1904年 Lamb<sup>[1]</sup>给出竖向谐和扰力作用于弹性半空间表面及波在土中传播产生动位移的解,其力学分析、数学运算极为复杂。1936年 Reissner<sup>[2]</sup>用其得出扰力作用于无质量刚性圆板、底部受均匀压应力的位移解,并提出了无量纲频率  $a_0$  和质量比  $b$ 。因计算上有差错等原因与试验结果不完全相符,未被工程人员立即采用,但其奠定了基础,后来成为常用依据,很多学者对此进行了研究和引用。1953年 Sung<sup>[3]</sup>对其得出了底部压应力为静刚性分布、均匀分布和抛物线分布的位移解。1962年 Hsich<sup>[4]</sup>用反力代入法得出扰力作用于块体基础类似于质弹体系的半空间等效集总体系公式,表明阻尼和刚度都是振动频率的函数,从而转折性地开创了实用化途径。由于随频率而变,仍不便使用,需进一步实用化,1965年出现了用于竖向振动的莱斯默(J. Lysmer)比拟法<sup>[5]</sup>。1967年 Hall<sup>[6]</sup>按照莱斯默思路把比拟法推广到滑移、摇摆和扭转振动。

## 2 比拟法的阻尼比和刚度

### 2.1 基本公式

竖向谐和扰力  $P = P_0 e^{i\omega t}$  作用于无重量的刚性圆板(图1)时,板中心的竖向位移为<sup>[2]</sup>:

$$Z = \frac{P_0 e^{i\omega t}}{Gr_0} (f_1 + if_2) \quad (1)$$

式中: $G$  为土的剪切模量; $r_0$  为圆板半径; $\omega$  为扰力频率; $f_1$ 、 $f_2$  为位移函数,即无量纲频率  $a_0$  与泊松

比  $\nu$  的复函数。

$$a_0 = r_0 \omega / v_s \quad (2)$$

式中: $v_s$  为剪切波速; $\rho$  为土的密度。

对时间  $t$  微分:

$$\dot{Z} = i\omega Z \quad (3)$$

由式(1):

$$P_0 e^{i\omega t} = \frac{Gr_0 Z}{f_1 + if_2} = \frac{(f_1 - if_2) Gr_0}{f_1^2 + f_2^2} Z$$

可得复刚度:

$$K_{dd} = \frac{P_0 e^{i\omega t}}{Z} = Gr_0 \left( \frac{f_1}{f_1^2 + f_2^2} - \frac{if_2}{f_1^2 + f_2^2} \right) \quad (4)$$

再由式(3):

$$K_{dd} = \frac{Gr_0 f_1}{f_1^2 + f_2^2} - \frac{Gr_0 f_2}{\omega Z (f_1^2 + f_2^2)} \dot{Z} \quad (4a)$$

式(4a)的推导较直接,若等式两边同乘以  $Z$ ,即得文献[8]中式(7)~(14),或文献[4]中式(4)。

按文献[7],具有质量  $m$  的块体基础,考虑内阻尼  $c_z$ ,在谐和扰力  $Q$  作用下(图1),按平衡条件的振动方程为:

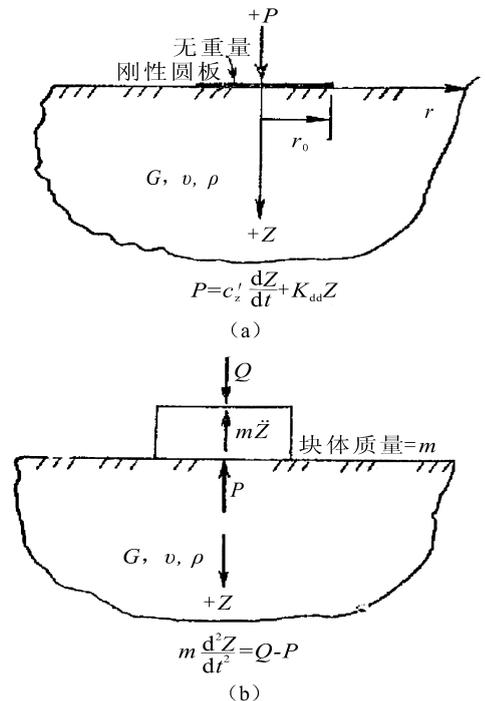


图1 基础板、块振动示意图(参见文献[8])

Fig.1 Vibration of plate and block on the foundation (See Reference [8])

$$m\ddot{Z} + c'_z \dot{Z} + K_{dd}Z = Q = Q_0 e^{i\omega t} \quad (5)$$

其中:  $Q = P + m\ddot{Z}$ 。

将  $K_{dd}$  代入, 可得:

$$m\ddot{Z} + \left( c'_z + \frac{Gr_0}{\omega} \cdot \frac{-f_2}{f_1^2 + f_2^2} \right) \dot{Z} + \frac{Gr_0 f_1}{f_1^2 + f_2^2} Z = Q_0 e^{i\omega t} \quad (6)$$

令

$$c''_z = \frac{Gr_0}{\omega} \cdot \frac{-f_2}{f_1^2 + f_2^2} \quad (7)$$

则有

$$c_z = c'_z + c''_z \quad (8)$$

又令

$$K_d = Gr_0 \frac{f_1}{f_1^2 + f_2^2} \quad (9)$$

其中:  $K_d$  为动刚度。

式(6)与单自由度体系受强迫振动方程相似, 不

同的是  $c''_z$  与  $K_d$  不是常数, 而是  $f_1$ 、 $f_2$  的函数。

从式(4a) 可看出,  $K_{dd}$  中有两项, 第一项与位移有关, 第二项涉及速度, 与胶质阻尼相似, 可看作带有阻尼的复刚度。若将第二项中的阻尼归入式(6) 阻尼项内, 仅将第一项视作动刚度  $K_d$ , 见式(9)。因而在式(8)中, 阻尼系数有两项: 一是  $c'_z$ , 为内阻尼; 二是  $c''_z$ , 为基础振动时有部分能量随振波扩散而消失, 称为辐射阻尼或波散阻尼。前者很小, 常取阻尼比为 0.05, 可临时加入; 后者较大, 阻尼比也较大。

再令

$$F_1 = \frac{f_1}{f_1^2 + f_2^2} \quad (10)$$

$$F_2 = \frac{-f_2}{(f_1^2 + f_2^2)a_0} \quad (11)$$

$f_1$ 、 $f_2$  见文献[9]、[10] 有关插图; 文献[4]中已得出  $F_1$ 、 $F_2$  的近似值, 见表 1, 相应得表 2。

表 1  $F_1$ 、 $F_2$  的近似式

Table 1 Approximate formulas of  $F_1$  and  $F_2$

振动类别	$\nu=0$		$\nu=\frac{1}{4}$		$\nu=\frac{1}{2}$	
	$F_1$	$F_2$	$F_1$	$F_2$	$F_1$	$F_2$
竖向 $0 < a_0 < 1.5$	$4 - 0.5a_0^2$	$3.3 + 0.4a_0$	$5.3 - a_0^2$	$4.4 + 0.8a_0$	$8 - 2a_0^2$	6.9
扭转 $0 < a_0 < 1.5$	$5.1 - 0.3a_0^2$	$0.5a_0$	$5.1 - 0.3a_0^2$	$0.5a_0$	$5.1 - 0.3a_0^2$	$0.5a_0$
水平 $0 < a_0 < 2$	$4.5 - 0.2a_0^2$	$2.4 + 0.3a_0$	$4.8 - 0.2a_0^2$	$2.5 + 0.3a_0$	$5.3 - 0.1a_0^2$	$2.8 + 0.4a_0$
旋转 $0 < a_0 < 2$	$2.5 - 0.4a_0$	$0.4a_0$	-	-	-	-

表 2 与  $F_1$ 、 $F_2$  有关的数值

Table 2 Numerical values related to  $F_1$  and  $F_2$

$a_0$	$\frac{1-\nu}{4} F_1$			$\frac{1-\nu}{4} F_2$		
	$\nu=0$	$\nu=\frac{1}{4}$	$\nu=\frac{1}{2}$	$\nu=0$	$\nu=\frac{1}{4}$	$\nu=\frac{1}{2}$
0.1	1.0	0.99	1.0	0.83	0.84	0.86
0.3	0.99	0.98	0.99	0.85	0.87	0.86
0.5	0.97	0.95	0.94	0.87	0.90	0.86
0.7	0.94	0.90	0.88	0.89	0.93	0.86
0.9	0.90	0.84	0.80	0.91	0.96	0.86
1.1	0.85	0.77	0.70	0.93	0.99	0.86
1.3	0.79	0.67	0.58	0.95	1.02	0.86
1.5	0.71	0.57	0.44	0.97	1.05	0.86

莱斯默经过研究, 再作简化, 大致如下。

式(9) 可写为

$$K_d = Gr_0 F_1 = \frac{4Gr_0}{1-\nu} \cdot \frac{1-\nu}{4} F_1 \quad (12)$$

又由式(2):  $\omega = \frac{a_0}{r_0} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$

则式(7) 为

$$c''_z = r_0^2 \sqrt{\rho G} F_2 = \frac{4}{1-\nu} \cdot r_0^2 \sqrt{\rho G} \cdot \frac{1-\nu}{4} F_2 \quad (13)$$

式(12)中, 因等式最右边第一个因子为静刚度, 第二个因子可视为修正系数。从表 2 可知, 当  $a_0$  小即低频时,  $(1-\nu)F_1/4 \approx 1$ , 可得静刚度

$$K_z = \frac{4 Gr_0}{1-\nu} \quad (14)$$

或在式(12) 右边第 1 个等式中, 当 (见表 1 竖向)  $a_0 = 0$ , 又当  $\nu = 0, 0.25$  及  $0.5$ , 则  $Gr_0$  的系数为 4、5.3 及 8, 系数的通式可写为  $4/(1-\nu)$ , 亦得式(14)。

又从表 2 中, 在中频时可取  $0.3 < a_0 < 0.8$  (在此范围之外离开了共振区, 阻尼作用不大), 因而可取  $(1-\nu)F_2/4 \approx 0.85$ , 从而由式(13) 可得

$$c''_z = \frac{3.4r_0^2 \sqrt{\rho G}}{1-\nu} \quad (15)$$

因而阻尼比

$$\zeta_z = \frac{3.4r_0^2 \sqrt{\rho G}}{2\sqrt{m \cdot 4Gr_0}} \frac{1}{1-\nu} = \frac{0.425}{\sqrt{B_z}} \quad (16)$$

$$B_z = \frac{1-\nu}{4} b = \frac{1-\nu}{4} \cdot \frac{m}{\rho r^3} \quad (17)$$

式中:  $b$  为质量比;  $B_z$  为修正质量比。

其他振动可以此类推,见文献[6]。

## 2.2 刚度分析

### 2.2.1 刚度分类

根据上文推导,刚度有三种:一是复刚度,即与阻尼有关的动刚度,有  $F_1$ 、 $F_2$ (见表 1);二是动刚度,与阻尼无关,因已归入阻尼项内,只有  $F_1$ ,无  $F_2$ ;三是静刚度,其在低频,  $F_1$  中的  $\alpha_0 \doteq 0$ , 只与泊松比即土质有关。现对静刚度式(14)推导如下。

对半无限体面上受匀布压力,在不同形状面积上的平均竖向位移  $\omega$  见文献[11]中式(212),即

$$\omega = \frac{mP(1-\nu^2)}{E\sqrt{A}}$$

因而有

$$K_z = \frac{P}{\omega} = \frac{E\sqrt{A}}{m(1-\nu^2)}$$

式中: $P$  为总静载荷; $A$  为载荷面积; $m$  为因子。当面积为圆形、方形及矩形边长比为 1.5、2、2.5 时,  $m = 0.96, 0.95, 0.94, 0.92$  及 0.90。

由于  $A = \pi \cdot r_0^2$ ,  $r_0$  为圆半径,对于矩形则为等效半径:  $r_0 = \sqrt{A/\pi}$ , 又  $E = 2(1+\nu)G$ , 因此可得

$$K_z = \frac{\beta Gr_0}{1-\nu^2}$$

式中  $\beta = 3.545/m$ , 对应于  $m$ ,  $\beta = 3.69, 3.73, 3.77, 3.85, 3.94$ 。对  $\beta$  取整数为 4, 即得本文式(14)。

### 2.2.2 动、静刚度的关系

此关系在上述分类中已说明,在文献[12]中另有论述,用地基弹性模量  $E$  表示,现略作补充。

(1) 静刚度为

$$K_z = \frac{4Gr_0}{1-\nu} = \frac{1.128E\sqrt{A}}{1-\nu^2} \quad (18)$$

$A$  为基础底面积。相应静刚度系数为

$$C_z = \frac{1.128E}{(1-\nu^2)\sqrt{A}} = k \frac{E}{\sqrt{A}} \quad (19)$$

式中:

$$k = \frac{1.128}{1-\nu^2} \quad (20)$$

当  $\nu = 0, 0.25$  及  $0.5$  时,即与土质有关,则  $k = 1.128, 1.203$  及  $1.504$ 。

(2) 动刚度为

$$K_d = Gr_0 F_1 = \frac{E\sqrt{A}}{2\sqrt{\pi}(1+\nu)} F_1 \quad (21)$$

相应动刚度系数为

$$C_d = \frac{K_d}{A} = \frac{E}{2\sqrt{\pi}(1+\nu)\sqrt{A}} F_1 \quad (22)$$

在  $F_1$  中,当  $\alpha_0 = 0$ , 则  $C_d$  为静刚度  $C_z$ ; 又由表 1 竖向振动,当  $\nu = 0, 0.25$  及  $0.5$ , 则  $F_1 = 4, 5.3$  及  $8$ ; 再由式(22)可得出式(19)的  $C_z$  与式(20)相同的  $k$  值。

(3) 上述的地基弹性模量  $E$  对应于弹性应变,不考虑土的残余变形,远小于土的总应变,因此  $E$  远大于考虑总应变的变形模量  $E_0$  或压缩模量  $E_s$ , 可用于动力基础计算。因此  $E$  值的选择很重要,若选用不当,则计算结果差别很大。

(4) 动、静刚度之比为  $\frac{1-\nu}{4} F_1 \leq 1$ , 见表 2。因此

此动刚度小于静刚度,随  $\alpha_0$  即  $\omega$  及  $\nu$  增加,其比值变小,表 2 中右下角与左上角两值之比已达 0.44。

## 2.3 参振土质量

$F_1$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$F_1 = \xi_1 - \xi_2 \alpha_0^2 \quad (23)$$

因  $K_d = Gr_0 F_1 = \xi_1 Gr_0 - \xi_2 \alpha_0^2 Gr_0$ , 用式(2)代入并对式(3)再微分,可得

$$K_d = \xi_1 Gr_0 + \xi_2 r_0^3 \rho \ddot{Z} / Z \quad (24)$$

由式(6)(不考虑内阻尼)单自由度振动方程为

$$m \ddot{Z} + \sqrt{\rho} Gr_0 F_2 \dot{Z} + K_d Z = Q \quad (25)$$

用式(24)代入式(25),则有

$$(m + \xi_2 r_0^3 \rho) \ddot{Z} + \sqrt{\rho} Gr_0 F_2 \dot{Z} + \xi_1 Gr_0 Z = Q \quad (26)$$

当  $\alpha_0 \doteq 0$ , 则  $\xi_1 \doteq F_1$ 。

故式(26)等号左边第 3 项为:

$$\xi_1 Gr_0 Z \doteq \frac{4Gr_0}{1-\nu} \cdot \frac{1-\nu}{4} F_1 Z$$

查表 2, 当  $\alpha_0 \doteq 0$ , 则  $\frac{1-\nu}{4} F_1 \doteq 1$ 。故  $\xi_1 Gr_0 Z \doteq$

$\frac{4Gr_0}{1-\nu} Z = K_z Z$ ,  $K_z$  为静刚度。

相应的式(26)为

$$m' \ddot{Z} + \sqrt{\rho} Gr_0 F_2 \dot{Z} + K_z Z = Q \quad (27)$$

式中

$$\begin{aligned} m' &= m + \Delta m \\ \Delta m &= \xi_2 r_0^3 \rho \end{aligned} \quad (28)$$

当  $\nu = 0, 0.25, 0.5$ , 由表 1 竖向振动,得  $\xi = 0.5, 1.0, 2.0$ 。

$m$  为基础块体质量;  $\Delta m$  为参振土质量,或称附加质量,与文献[4]中式[26(c), (b), (a)]相同,该式由共振得出。

相应自振频率

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_z}{m + \Delta m}} \quad (29)$$

为更直观分析,假想参振土折算厚度为  $h'$ ,底面积  $A$  为圆形时,则

$$h' = \frac{\Delta m}{A\rho} = 0.318\xi_2 r_0 \quad (30)$$

对于底面积  $A$  为矩形  $bd$ , 则

$$h' = 0.18\xi_2 \sqrt{bd} \quad (31)$$

为了表示与原质量  $m$  的关系,可设质量附加系数

$$\psi = \frac{m'}{m} = 1 + \frac{\Delta m}{m} \quad (32)$$

在文献[14]附表 II-1 中亦有质量附加系数,其中附表 II-2 为求阻尼比,需用质量比

$$b = \frac{m}{\rho r_0^3} \quad (33)$$

现举例如下:已知基础底面积  $bd$  为  $10 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ ,  $r_0 = 6.68 \text{ m}$ ,  $m = 1\ 380 \text{ t}$ ,  $\rho = 1.9 \text{ t/m}^3$ ,  $\nu = 0.25$ , 试求参振土质量。

解:由式(30),可得  $h' = 2.12m$ 。

因  $\Delta m = h'A\rho$ ,亦可由式(28)直接得出。

当  $\nu = 0.25$ ,故  $\Delta m = 566.3 \text{ t}$ ,  $\psi = 1.408$  (1.257)。

相应  $B_z = 0.644$ ,  $\xi_z = 0.529$  (0.544),

又  $\omega_n = 0.022\ 7\sqrt{K_z}$  (0.024 0 $\sqrt{K_z}$ )

括号内按文献[14]附表 II-1,2 得出,在此  $b = 2.44$ ,因其用博罗达契夫解<sup>[15-16]</sup>而较精确。由于两者接近,当无该附表时,似可用式(28)直接计算,其误差不大。

在莱斯默比拟法中使用了静刚度  $K_z$ ,可将  $m$  改  $m'$ 以作修正,文献[14]也说明使用静刚度时,要用参振土质量配套。

因在莱斯默比拟法中未考虑参振土质量对地基阻尼比的影响,在下文 5.3 节将不考虑其影响的阻尼比(本例为 0.627)折减,因为折减系数已包括此项因素。如果考虑则阻尼比偏小(本例为 0.529),应相应提高折减系数。

### 3 比拟法结果汇总

竖向、滑移、摇摆及扭转的计算公式详见文献[14]或文献[17]的汇总表,现从略。

### 4 两种理论的结合

目前动力基础的计算有两种理论,即质弹体系和半空间体系。两者都建立在地基弹性之上,在弹性范围内地基弹性变形大致与作用力成比例。

质弹体系计算模型较为简单,把地基直接当作无质量弹簧,设计计算也简单,便于使用。但该模型未考虑振波传播的影响,许多矛盾不便解释。同时其计算参数即阻尼比和刚度需由试验给出,虽是缺点,但也可参考规范或有关资料得出,因而具有灵活性<sup>[13]</sup>,容纳来自实践总结的经验,接受半空间理论的某些结果。

半空间理论把地基当作半无限体考虑,有着严格的力学分析和数学运算。该理论切合实际,考虑了振波在土中的传播作用,许多问题能得到解释。特别是与质弹体系等效比拟之后,由于波能的消耗,提出了辐射阻尼,这是一个重大贡献,其经济效益很大。在此之前由于力学分析、数学运算极为复杂,半空间理论长期以来的实用性不强,后来等效为质弹体系,利用了质弹体系的灵活性才迅速发展。从此两者结合起来,其振动公式以质弹之形表半空间之实。当然半空间理论也存在问题,由于假定土体为匀质,各向同性,波速不反射、折射。但实际上土体远非匀质、同性,且存在分层,使波速反射和折射,减小了能量消耗,同时也减小了阻尼。同时比拟法中以静刚度代替动刚度,未考虑参振土质量的影响,以及对匀质半空间理论应按非匀质进行修正问题等尚待解决,但这些属于近似程度问题,对其大方向无影响,不能因此否定该理论。总的来说,将两者结合,通过实践不断修正,希望今后能得到一个较完善的等效质弹体系。

## 5 两个振动台基础试验的启示

由上所述,地基动参数即阻尼比与刚度的取用很重要,因理论计算复杂,可用试验确定。从下面的试验我们可以得到启示。

### 5.1 北京某大学液压振动台基础

试验设备从国外引进,基础由试验人员自行设计。该基础建于 1983 年,地基为粉质黏土,承载力为 150 kPa。因接建而旧基础浅,不能深挖而用桩基。参照当时规范<sup>[18]</sup>取阻尼比  $\xi = 0.2$ 。建成后在设备安装之前,用械式偏心块激振器激振,发现测得线位移远比按规范计算的小,峰点振幅也小得多,说明阻尼比取小了。后来用振动台的激振器分别作定、变扰力激振,用双峰法分析,得出阻尼比  $\xi = 0.52$ ,比规范的大。其后每隔几年跟踪测试多次,阻尼比变化不大。

### 5.2 北京某车辆研究所大型液压振动台基础

试验设备亦从国外引进,有十多个激振器,总扰

力在 2 000 kN 以上,频率为 0~100 Hz。基础建于 1989 年,地基为中风化砾岩层,承载力为 500 kPa。在设计准备阶段(即 1987 年),根据上条经验知道规范<sup>[18]</sup>的阻尼比过小,因此经计算包括埋深提高为 0.18,基础为 18 m×24 m×5 m(*h*),钢筋混凝土用料为 2 004 m<sup>3</sup>,相应工房跨度为 24 m。为了突破规范,提高阻尼比,在现场就近做了大量测试工作。

(1) 先做大模块 3 m×4 m×1.5 m(*h*)试验,用大扰力机械式偏心块激振器激振;

(2) 用质量 100 kg 的铁球,以落程 2.2 m 作冲击,作瞬态与稳态对比;

(3) 在基础底面下埋传感器测土层响应;

(4) 用跨孔法测波速,钻 3 个深 8 m 的孔,一孔激振,另两孔接收,得出纵、横波速,泊松比及剪切模量。为了验证,后又由另一测试单位在室内台基础旁钻 3 个孔测波速,两者结果接近。其中得到  $\zeta_z$  为 0.4,换算至设计基础为 0.5,相应基础为 11 m×16 m×5 m(*h*),用料为 994 m<sup>3</sup>,相应跨度为 18 m。用料大为减少。

由于从国外引进,并经去国外考察,该基础最终用半空间比拟法设计,阻尼比为 0.95,约大一倍;地基刚度也很高,基础为 10 m×14 m×5 m(*h*),用料为 544 m<sup>3</sup>,更为经济。后于 1992 年用振动台的激振器分别作定、变扰力激振,用双峰法分析,得出  $\zeta_z$  为 0.51,与模块换算值接近,说明比拟法的  $\zeta_z$  值太大了。之所以安全,在于地基刚度高。这又说明我国规范的地基刚度偏低,有待提高。

由于该振动台很大,基础设计倍受业内人士关注,特别是在国内首先用了半空间理论,基础又小,受到不少质疑。大约几年后,文献<sup>[19]</sup>根据上述经验,也用半空间理论设计某大型压力机基础,改版了按当时规范手册用阻尼比为 0.139 设计的施工图,同样大为经济。而且将匀质半空间的阻尼比 0.4(若加内阻尼 0.05 则为 0.45)修正为 0.243,实测为 0.25,说明半空间的亦大。

根据这两个试验的启示,多年来测试了国内一些液压台、大电动台基础及模块基础,有的还测试了波速,用以计算阻尼比,与比拟法对比后发现半空间比拟法的阻尼比确实过大,而我国规范的阻尼比则过小。不过计算表明,当阻尼比大至 0.6 以后作用较小,参见文献<sup>[20]</sup>图 1,图中  $u = f/f_n$ 。

### 5.3 关于匀质半空间比拟法阻尼比的修正

阻尼比过大是由于假定土体为匀质。根据实测、实例计算和国内外资料,以及匀质半空间自身的

缺点,可将其阻尼比予以折减,即考虑土体为非匀质而作修正。现将竖向的说明如下。

(1) 根据多年来对 20 多个振动台基础及模块测试资料,用双峰法或多峰法分析的结果,折减的下限约为半空间阻尼比的 50%;

(2) 文献<sup>[21]</sup>分析了很多土体测试数据,认为若取下限,亦可取半空间的一半;

(3) 文献<sup>[22]</sup>根据现场土层试验分析比较,半空间的阻尼比为质弹体系的 1.75~3.0 倍,反之,后者为前者的 0.33~0.57。由于地基阻尼比不是很小,文中用质弹体系求最大线位移公式忽略了阻尼比平方,不免偏小,若位移略有增大,则为 0.4~0.6,平均为 0.5,亦约为半空间的一半;

(4) 过去模态测试多用于上部结构,最近我们某合作单位用于某液压台基础,地基为土层,得出的阻尼比较大,但比半空间的小;

(5) 前苏联 1979 年的动力基础规范<sup>[23]</sup>对稳态振动的地基阻尼比,经过大量实测对比,取本文半空间式(16)的 70%,并得出简化公式。即在  $B_z$  中取  $\nu = 0.3$ ,取基础底面积  $A = A_0$ (基准底面积) = 10 m<sup>2</sup>,可得  $B_z = 0.175p$ ,相应  $\zeta_z = 0.7/\sqrt{p}$ , $p$  为基底平均压应力,以 t/m<sup>2</sup> 计,此即该规范中式(12),或改写为  $\zeta_z = 2/\sqrt{p}$ , $p$  以 kPa 计。可见前苏联早在 30 多年前已结合半空间理论提高了地基阻尼比,而且幅度较高,可见于文献<sup>[24]</sup>中表 2~5,或文献<sup>[17]</sup>中表 5.1.4。过去有人认为该式为经验公式,甚至认为未用半空间理论,实属误解。1996 年 5 月 14、15 两天,俄国动力基础规范主编、半空间理论学者 В. А. Ильичев 院士在中国冶金建筑科学研究院讲课,对此公式作了说明,文献<sup>[25]</sup>对此亦作介绍。

综上所述,可将半空间的竖向阻尼比总体折减 50%,相当于将苏联规范的取值再七折,更偏于安全。这样切合实际,且更实用,并已应用于新编液压振动台基础规范<sup>[28]</sup>。这提高了我国强振基础的地基阻尼比,一般可省料一半以上,经济效益特别显著。

在此补充一点,为了测试结果的可靠性,我们对重要基础曾请两个单位对测;或前后多年由不同单位跟踪测试,结果相接近。此外对于阻尼比的分析,系用双峰法或多峰法分析,见文献<sup>[28]</sup>中 4.2.10 条。

## 6 结语

关于动力基础半空间理论,虽早在国外流行,但

我国长期以来深受前苏联巴尔坎等<sup>[29]</sup>的质弹体系影响,几十年来处于研究状态,徘徊于低阻尼。设计规范虽然形式上也有所引用,但折减过低,实质上仍用小阻尼比。总的来说,是疑虑阻尼比取值大而不安全。

本文从实用出发,重点在于阻尼比。首先说明辐射阻尼的成因客观存在;然后说明大于 0.6 的影响较小;继而通过一些试验,并参照国内外经验,适当折减阻尼比以作修正,以增强其实用性。研究成果已首先用于我国强振规范<sup>[28]</sup>,由于引用文献<sup>[26]</sup>的比例,水平回转等阻尼比亦可相应提高,与文献<sup>[23]</sup>相似。希望今后通过更多的工程实践,对此进行调整,包括地基刚度的提高,并全面应用工程实践中。

## 参考文献 (References)

- [1] H Lamb. On the Propagation of Tremors Over the Surface of an Elastic Solid[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London; Ser A, 1904; 203, 1-42.
- [2] E Reissner. Stationäre, Axialsymmetrische, Durch Eine Schüttelnde Masse Erregte Schwingungen Eines Homogenen Elastischen Halbraumes [J]. Ingenieur-Archiv, 1936, 7 (6): 381-396.
- [3] T Y Sung. Vibrations in Semi-infinite Solids due to Periodic Surface Loading Symposium on Dynamic Testing of Soils[J]. ASTM-STP, 1953(156); 35-63.
- [4] T K Hsieh. Foundtion Vibrations[C]//Proceedings of Institution of Civil Engineers, 1962, 22; 211-226.
- [5] J Lysmer. Vertical Motion of Rigid Footings[R]. Dept of Civil Eng Univ of Michigan, Report to WES Contract Report, 1965; 3-115.
- [6] J R Hall. Coupled Rocking and Sliding Oscillations of Rigid Circular Footings[C]//Proceedings International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials. Albuquerque, New Mexico; [s.n.], 1967.
- [7] 钱培凤. 计算动力基础的两种理论[G]//动力基础设计规范汇编资料(三). 北京: 动力基础设计规范编制组, 1975, 8: 18-24.  
QIAN Pei-feng. Two Theories of Calculating Dynamic Foundation[G]//A Compilation of Codes for Design of Dynamic Foundation (3rd). Beijing; The Compilation Group for Codes for Design of Dynamic Foundation, 1975, 8: 18-24. (in Chinese)
- [8] F E 小理查特, R D 伍兹, J R 小霍尔, 著. 徐攸在, 徐国彬, 曾国熙, 等译. 土与基础的振动[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1976; 201.  
F E Riechart Jr, R D Woods, Jr Hall, Write. XU You-zai, XU Guo-xi, ZENG Guo-bin, Translate. Vibrations of Soils and Foundations [M]. Beijing; China Architecture & Building Press, 1976; 201 (in Chinese)
- [9] R N Arnold, G N Bycroft, G B Warbuton. Forced Vibration of a Body on an Infinite Elastic Solid[J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22; 391-400.
- [10] G N Bycroft. Forced Vibrations of a Rigid Circular Plate on a Semi-infinite Elastic Space and on an Elastic Stratum[J]. Phil Trans Royal Society of London; Ser A, 1956, 248; 327-368.
- [11] 铁摩辛柯, 古地尔, 著. 徐芝伦, 吴永祺, 译. 弹性理论[M]. 北京: 人民教育出版社, 1964; 390.  
S Timoshenko, J N Goodier, Write. XU Zhi-lun, WU Yong-zhen, Translate. Theory of Elasticity [M]. Beijing; People's Education Press, 1964; 390. (in Chinese)
- [12] 林宗元. 岩土工程勘察设计手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996; 598.  
LIN Zong-yuan. Investigation and Design Manual of Geotechnical Engineering [M]. Shenyang; Liaoning Science and Technology Press, 1996; 598. (in Chinese)
- [13] 周叔举. 关于基础振动的两种计算理论[G]//冶金部成都勘察公司技术资料第 16 期, 1977, 9; 11.  
ZHOU Shu-ju. Two Calculation Theories Related to Foundation Vibration[G]//Technical Date of Chendu Investigation Company of Ministry of Metallurgy (16), 1977, 9; 11. (in Chinese)
- [14] 严人觉, 王贻荪, 韩清宇. 动力基础半空间理论概论[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1981; 203, 470.  
YAN Ren-jue, WANG Yi-sun, HAN Qing-yu. Introduction of Half Space Thoery for Dynamic Foundation[M]. Beijing; China Architecture & Building Press, 1981; 203, 470. (in Chinese)
- [15] Н М Бородачев. Динамическая контактная задача для штампа с плоским круговым основанием, лежащего на упругом пслупространстве, Изв. А. Н. СССР. Механика и машиностроение, 1964, 2.
- [16] Н М Бородачев. Вертикальные колебания круглого штампа на упругом полупространстве. Строительная механика и расчет сооружений, 1964, 5.
- [17] 徐建. 建筑振动工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002; 305.  
XU Jian. Hand Book for Building Vibration Engineering[M]. Beijing; China Architecture & Building Press, 2002; 305. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国国家标准编写组. GBJ40-79, 动力机器基础设计规范(试行)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980; 13.  
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GBJ40-79, Code for Design of Dynamic Machine Foundation (Trial for Implementation) [S]. Beijing; China Architecture & Building Press, 1980; 13. (in Chinese)
- [19] 杨先健, 徐永利, 张青山, 等. 125 000 kN 压力机基础设计[C]//建筑结构优秀设计图集 4. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005; 289-303.  
YANG Xian-jian, XU Yong-li, ZHANG Qing-shan, et al. Design of 125 000 kN Pressure Machine Foundation [C]//Fourth Excellent Design Drawing Collection of Building Structure[M]. Beijing; China Architecture & Building Press,

- 2005:289-303.(in Chinese)
- [20] 吴邦达,应怀樵.用强迫振动速度曲线分析地基阻尼比[J].建筑结构,2010,40(8):103-105.  
WU Bang-da, YING Huai-qiao. Using the Velocity Response Curve Under Forced Vibration to Manalyze Subsoil Damping Ratio[J]. Building Structure, 2010, 40(8): 103-105. (in Chinese)
- [21] 韩英才.基础-土相互作用的几个问题[J].建筑结构学报,1984,5(6):69-73.  
HANG Ying-cai. Several Problems of Soil-foundation Interaction[J]. Building Structure Journal, 1984, 5(6): 69-73. (in Chinese)
- [22] Anon. Damping Properties of Foundation-soil System[C]// Proceedings Forty-third Annual Research Session of Central Board of Irrigation & Power, 1973, 5: 105-112.
- [23] СНиП II-19-79, 苏联动力机器基础设计规范[S]. 化学工业部建筑设计技术中心站译. 1983: 20-21.  
СНиП II-19-79, Design of Dynamic Machine Foundation of the Soviet Union[S]. Translated of Building and Design by Technical center of the Ministry of Chemical Industry, 1983; 20-21. (in Chinese)
- [24] 《机器基础的振动分析与设计》编写组. 机器基础的振动分析与设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987: 13-14, 28.  
Compilation Group of Analysis and Design for Dynamic Machine Foundation. Analysis and Design for Dynamic Machine Foundation[M]. Beijing: China Railway Press, 1987; 13-14, 28. (in Chinese)
- [25] 杨先健,徐建,张翠红.土-基础的振动与隔振[M].北京:中国建筑工业出版社,2013:40.  
YANG Xian-jian, XU Jian, ZHANG Cui-hong. Vibration and Isolation of Soil-foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 40. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50040-96, 动力机器基础设计规范[S].北京:中国计划出版社,1996:13,  
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50040-96, Code for Design of Dynamic Machine Foundation[S]. Beijing: China Planning Press, 1996. (in Chinese)
- [27] 吴邦达,吴丽波.地基动力特性分析中的点峰法与多峰法[J].地震工程学报,2015,37(1):68-73.  
WU Bang-da, WU Li-bo. Point-peak and Multi-peak Methods for Analyzing Parameter of Dynamic Properties of Subsoil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 68-73. (in Chinese)
- [28] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50699-2011, 液压振动台基础技术规范[S].北京:中国计划出版社,2011:7-9,13-17.  
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50699-2011, Technical Code for Hydraulic Vibrator Foundation[S]. Beijing: China Planning Press, 2011; 7-9, 13-17. (in Chinese)
- [29] Д Д Баркан. Динамика оснований и фундаментов [М]. Стройвоенмориздат, Москва, 1948: 93.  
D D Barkan. Dynamics of Bases and Foundations[M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1962.