

文章编号: 1001-3679(2008)01-0025-06

明置基础高层建筑风振时层状半空间 地基材料阻尼比的研究

陈 镨¹, 李 峰¹, 唐和生¹, 吕 鹏², 薛松涛^{1,3}

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 广州市设计院, 广东 广州 510620;

3. 日本近畿大学理工学部建筑学科, 日本 大阪 577-8502)

摘要: 利用层状半空间地基上明置基础阻抗函数的简化计算公式, 研究了明置基础高层建筑在动力风荷载作用下地基土材料阻尼比的取值范围。计算分析表明风振时层状场地地基土的材料阻尼比很小, 一般不超过 3%。因此, 土-结构相互作用对高层建筑风振响应并不一定有利。对有明置基础的弯剪型钢筋混凝土框架剪力墙高层建筑结构, 分别采用粘弹性均质半空间地基模型和层状半空间锥体地基模型, 进行了风振响应分析, 并将结果进行了对比。结果表明: 采用层状半空间锥体地基模型时, 一般考虑 7 层土介质已经可以基本满足要求; 选用层状半空间锥体地基模型, 结果较精确, 但计算量大, 而选用粘弹性均质半空间地基模型, 偏于保守, 但计算简便, 精度可以满足工程实际的需要。

关键词: 高层建筑; 土-结构相互作用; 风振响应; 阻尼比; 层状半空间锥体模型

中图分类号: P311.3 TU43

文献标识码: A

Preliminary Study of Damping Ratio for Layered Foundation Model of High-rise Building Subjected to Wind-induced Vibration

CHEN Rong¹, LI Feng¹, TANG Hesheng¹, LV Peng², XUE Songtao³

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, P.R.C.

2. Guangzhou Design Institute, Guangdong Guangzhou 510620, P.R.C.

3. Department of Architecture School of Science and Engineering, Kinki University, Japan Osaka 577-8502)

Abstract: A simplified formula for evaluating impedance functions of box basement on layered foundation is used to study the soil material damping ratio for the wind-induced vibration of high-rise building on the box basement. It is found that for the above situation the soil material damping ratio is commonly less than 3%. Then, the viscous-elastic homogeneous half-space foundation model and the layered cone foundation model are used to evaluate the response of frame-shear wall structures with box basement subjected to along-wind load for comparison. The results show that only seven layers of soils need to be thought about when layered cone foundation model is selected. Using the layered cone foundation model, the results are comparative accurate but the computing amount is large while using viscous-elastic homogeneous foundation model, the computation is easy and effective and the accuracy can satisfy the need of practical engineering. In the response analysis of struc-

收稿日期: 2007-11-05 修订日期: 2007-11-16

作者简介: 陈 镨 (1944-), 男, 江苏南通人, 教授, 博士, 博士生导师, 目前主要从事地震工程、工程振动及地基基础等相关专业的研究工作。

基金项目: 建设部科技计划项目 (04-02-042)。

ture to wind-induced vibration, the effect of soil-structure interaction should be considered

Key words High-rise building; Soil-structure interaction; Wind-induced vibration; Damping ratio; The layered cone foundation model

0 前言

国内外研究者一般都认为结构在风荷载作用下振动时,地基土的材料阻尼很大,会耗散大量的振动能量,从而得出考虑土-结构相互作用(SS)后结构的响应会减小的结论^[1]。陈镭、薛松涛^[2]等人对高层框架结构进行了初步的计算研究,发现:对高层(高耸)结构,当地基阻尼较大,且上部结构刚度与地基刚度之比(即相对刚度)较大时,SS效应对体系的响应是有利的,地震作用下结构的响应属于此种情形;当地基土阻尼较小,且相对刚度较小时,SS效应对体系的响应不利,体系弹性位移响应会超过刚性地基时的值。目前对于SS对风振响应是否有利的分歧的关键在于高层建筑脉动风致振动时地基土的材料阻尼比的确定。

在实际工程中,结构的地基土是十分复杂的,其中最常见的是层状半空间地基。目前可应用于工程实际的阻抗函数简化计算方法不多。近年来,日本学者中村尚弘提出了利用跟踪波在土介质分界面反复反射、透射特性的方法,推导出了层状半空间地基上明置基础水平和回转运动阻抗函数的简化计算公式^[3]。张剑寒及蒋通利用锥体模型,对层状半空间地基上块式基础地基阻抗函数的简化计算方法进行了较为系统的研究,提出了一套较为完整的层状半空间地基上明置基础阻抗函数的简化计算方法^[4]。本文在文献[4]的基础上,考虑了地基土的材料阻尼比,研究了高层建筑在动力风荷载作用下地基土的材料阻尼比的取值范围。然后对粘弹性半空间及层状半空间上有明置基础的高层建筑风振响应进行了对比,得出了一些有工程应用价值的结论。

1 层状半空间地基上明置基础阻抗函数

张剑寒及蒋通利用锥体模型^[4]得到层状半空间地基上明置基础竖向、水平、回转及扭转运动的阻抗函数^[4],其中水平及回转运动的阻抗函数如下。

水平方向:

$$S(\omega) = K \frac{1 + \frac{\omega \xi_g}{c}}{1 + \sum_{j=1}^{\infty} \zeta_j e^{-\delta_j t_j}} \tag{1}$$

回转方向:

$$\begin{aligned} S_j(\omega) = & 1 - \frac{1}{3} \frac{(\frac{\omega \xi_g}{c})^2}{1 + (\frac{\omega \xi_g}{c})^2} + \frac{\omega \xi_g}{3c} \frac{(\frac{\omega \xi_g}{c})^2}{1 + (\frac{\omega \xi_g}{c})^2} \\ & K_0 \frac{1 + \frac{1}{1 + \frac{\omega \xi_g}{c}} (\sum_{j=1}^{\infty} \zeta_j e^{-\delta_j t_j} + \frac{\omega \xi_g}{c} \sum_{j=1}^{\infty} \zeta_j e^{-\delta_j t_j})}{1 + \frac{\omega \xi_g}{c}} \end{aligned} \tag{2}$$

式中各字符的定义与文献[4]中相同。

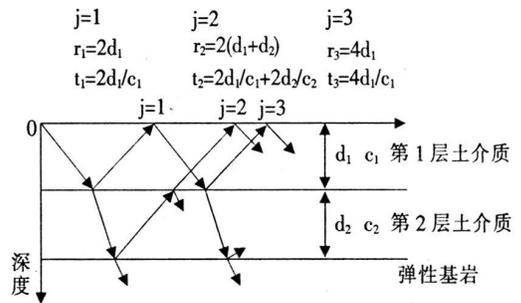


图 1 3层土介质层状半空间地基中波的传播特性
波在土介质分界面上的反射与透射系数见文献[4],图1给出了以3层土介质地基为例的波的传播特性和反射系数计算过程。由于是研究风振动力响应,这里只考虑由地表向下传播的波。

本文利用上述水平与回转的阻抗函数。为了考虑土体材料阻尼比,在K及K₀前均乘以(1+2ξ_g),ξ_g为表层土体的材料阻尼比,它要由结构-土体系的动力分析,求得基底土的应变,然后再由土的应变-阻尼比关系求得。原则上讲,它应当是一个迭代计算的过程。

显然,考虑的地基土层数越多,计算得到的结果将越精确。但是,随着考虑的地基土层数的增加,波传播路径的数量将急剧增加,计算量也急剧增大,而且经过多次反射与折射,波幅也将快速减小,对阻抗函数值的贡献将越来越小,所以对计算准则提出以下几点建议:

(1) 首先计算 4 层地基土时系统的动力响应, 然后逐层增加, 计算系统响应, 当相邻 2 次计算得到的响应差值在一定范围之内时, 认为结果已经足够接近精确值, 停止计算;

(2) 由于波传播的可能路径几乎是无限的, 考虑以波传播的时间为标准来控制参与计算的波传播路径的数量。以 4 层土介质的地基为例, 以经过 2 次透射在底层土界面上反射的波传播的时间为界, 传播时间小于的所有可能的波传播路径都要计算在内;

(3) 下行波向上反射后将不再考虑其向此层以下的土介质传播的情况。

2 地基土的材料阻尼比的计算

在土体材料阻尼比方面, 前人做的一些研究已经得到广泛地认可。Seed 和 Idris^[6] 对 Weillsmann 和 Martiñ Donovan 等学者测得的阻尼比进行了综合分析, 并给出了在砂土孔隙比为 $e=0.5$ 时的土体剪应变—阻尼比关系曲线, 见图 2。文献[6]中提到, 阻尼比随应变幅的减小而减小, 当应变幅很小 ($<10^{-6}$) 时, 土的材料阻尼比接近于零。

对于均质半空间, 可用粘弹性半空间模型模拟, 这里采用 Veletsos 提出的阻抗函数。阻抗函数中 $\tan \delta$ 体现了地基中材料阻尼比 ξ_g 的影响, 它对结构的响应会产生重要的作用, 它与阻尼比的关系为 $\tan \delta = 2\xi_g$ 。在地震时, $\tan \delta$ 常取 $0.1 \sim 0.4$ ^[5]; 笔者认为, 在实际的风振响应计算时, 为了获得较准确的地基土的阻尼比, 需要进行迭代计算。即先预设一个较小的阻尼比 $\xi_g^{(0)}$, 然后计算体系的风振响应, 求得基础位移, 按图 2 得到新的阻尼比 $\xi_g^{(1)}$; 重复上述步骤 n 次, 当 $|\xi_g^{(n)} - \xi_g^{(n-1)}| \leq \epsilon$, ϵ 为预先设定的一个小值, 停止迭代, 此时的 $\xi_g^{(n)}$ 即土的最终阻尼比。

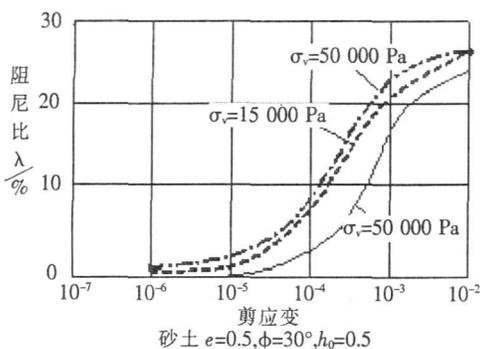


图 2 土体剪应变—阻尼比关系曲线图

本文算例中取 $\tan \delta = 0.01$, 得到基底应变为 10^{-5} 左右, 根据图 2 可以看出地基土的材料阻尼比取值范围为 $2\% \sim 2.5\%$ 。将算例中的 $\tan \delta$ 改为 0.05 重新计算体系的动力响应, 地基土阻尼比的取值范围仍为 $2\% \sim 2.5\%$ 。从图 2 可看到, 即使当土体压应力为 $50\,000\text{ Pa}$ 时, 地基土阻尼比也不超过 3% 。所以, 总的来看, 考虑土—结构动力相互作用时, 明置基础高层建筑风致振动的地基土材料阻尼比取值很小, 一般不超过 3% , $\tan \delta$ 不超过 6% 。

3 弯剪型结构考虑 SS 时的动力响应

3.1 结构的模型与计算参数

本文以明置基础上 8 层、12 层、16 层和 20 层的弯剪型钢筋混凝土框架剪力墙结构为对象, 进行风振动力响应的分析以确定它们在风振时的地基土材料阻尼比。结构除了层数不同外, 其余参数取值相同。各层的平面布置图见图 3。楼截面尺寸为 $24\text{ m} \times 24\text{ m}$, 混凝土等级为 C35, 柱截面尺寸取 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$, 主梁截面取 $0.6\text{ m} \times 0.3\text{ m}$, 层高为 3.0 m , 基础高取 4.5 m 。对上部结构采用滞后阻尼, 滞后阻尼比 $\eta = 2\xi_s$, ξ_s 为结构的粘滞阻尼比, 取 $\xi_s = 0.05$ 。基本风压 w_0 通过《建筑结构荷载规范 GB50009—2001》选取 (上海地区, 重现期为 100 年, $w_0 = 0.60\text{ kN/m}^2$); 地面粗糙度取 C 类; 地基土的泊松比 μ 取 0.05 。由于脉动风速与平均风速之比 $v(z, t)/\bar{v}(t)$ 很少会超过 0.2 暂定 $\tan \delta = 0.01$ 。

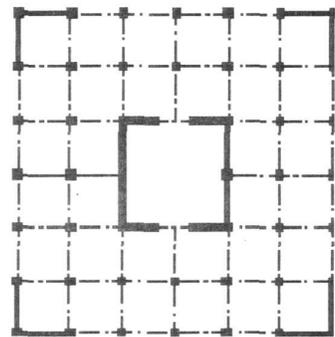


图 3 结构标准层平面布置图

对于层状半空间土介质, 采用上海浦东地区环球金融中心的地质勘测资料 (见表 1)。8 层结构直接采用表 1 中的场地参数, 为了与地基土承载力相匹配, 结构每增加 4 层, 表层土的剪切波速增加 40 m/s 。

表 1 场地参数

层号	层厚 /m	密度 (T/m^3)	剪切波速 (m/s)	泊松比 μ
1	9	1 790 0	100	0 490 00
2	3	1 820 0	140	0 484 29
3	9	1 840 0	200	0 481 43
4	9	1 860 0	260	0 478 57
5	9	1 880 0	320	0 475 71
6	42	1 930 0	380	0 470 00
7	15	1 990 0	420	0 458 57
8	12	2 020 0	460	0 455 71
9	6	2 040 0	500	0 452 86
10	12	2 070 0	550	0 450 00

3.2 结构的动力响应

3.2.1 考虑不同地基土层数计算结果的比较

根据以上数据编制 Matlab7.0 计算程序,对 4层~7层土的锥体模型进行计算,得到层状半空间

地基上弯剪型钢筋混凝土框架剪力墙结构的风振动力响应。频率间隔 $\Delta\omega$ 取 0.05 总共 1 000 个样点。表 2 及表 3 给出 8 层~20 层结构考虑不同土层数时响应(顶层质点总位移、基底总水平动荷载及基底应变幅值)比较。

从表 2 可以看出,随着锥体模型土层的增加,风振响应逐步减小,但减小的幅度有限。从表 3 中可以看到,对于顶层位移幅值,考虑 7 层土介质时的计算结果与考虑 6 层土介质时的差值百分比都在 2% 以内。说明随着考虑的土介质层数的增加,计算结果将逐渐趋于精确值。但土介质层数的增加将大大增加计算量和计算难度(考虑 4 层、5 层、6 层和 7 层土介质时的波行进路线分别为 5 条、9 条、16 条和 120 条,考虑 8 层土介质时波行进路线数将达到 300 条左右)。所以,考虑 7 层土介质时的计算结果已经基本可以满足要求。

表 2 考虑不同地基土层数时风振动力响应

结构层数	计算项目	考虑 4 层土	考虑 5 层土	考虑 6 层土	考虑 7 层土
8	顶层质点的总位移 / $\times 10^{-5}$ m	77	73	71	70
	基底总水平荷载 / kN	226.4	213.2	205.8	203.7
	基底应变幅值	2	1.9	1.8	1.8
12	顶层质点的总位移 / $\times 10^{-5}$ m	171	165	163	162
	基底总水平荷载 / kN	553.4	522.4	510.5	506.1
	基底应变幅值 / $\times 10^{-5}$ m	2.6	2.4	2.3	2.3
16	顶层质点的总位移 / $\times 10^{-5}$ m	260	250	245	244
	基底总水平荷载 / kN	912.8	863.7	842.9	838.2
	基底应变幅值 / $\times 10^{-5}$ m	2.5	2.4	2.3	2.3
20	顶层质点的总位移 / $\times 10^{-5}$ m	540	524	518	516
	基底总水平荷载 / kN	1 487.4	1 430.9	1406	1 400.1
	基底应变幅值 / $\times 10^{-5}$ m	2.7	2.6	2.5	2.5

表 3 考虑不同土层数时计算结果比较

响 应 层 数	顶层位移			基底应变幅值		
	$H_4 - H_5$	$H_5 - H_6$	$H_6 - H_7$	$H_4 - H_5$	$H_5 - H_6$	$H_6 - H_7$
8 层结构	5.5%	2.8%	1.4%	5.3%	5.6%	0
12 层结构	3.6%	1.2%	0.6%	8.3%	4.3%	0
16 层结构	4.0%	1.7%	0	4.2%	4.3%	0
20 层结构	3.1%	1.2%	0.4%	3.8%	4.0%	0

注:表中 $H_4 - H_5$ 表示在考虑 4 层土时的顶层质点位移幅值与考虑 5 层土时的差值百分比,其它类似。

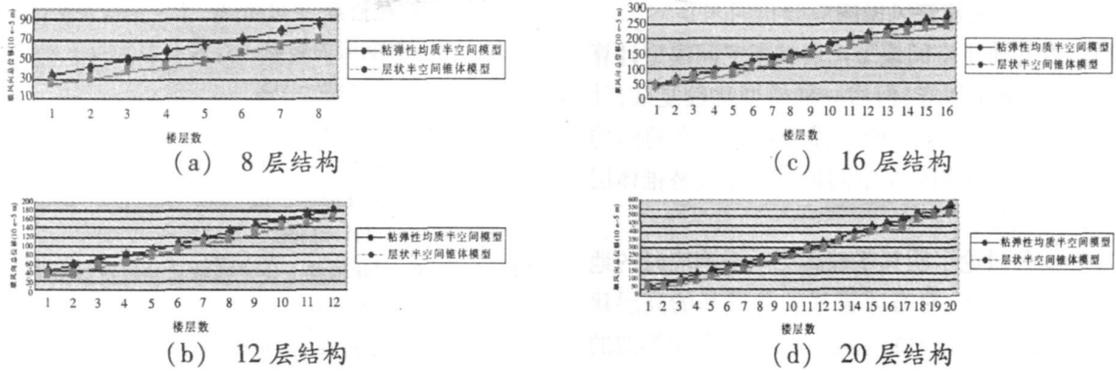


图 4 采用 3 种地基模型计算的结构各层质点的顺风相总位移的比较

表 4 采用 2 种模型计算的结果

地基模型	结构层数	顶层质点的位移 / $\times 10^{-5}$ m	基底总荷载 / kN	基底应变 / $\times 10^{-5}$
粘弹性均质半空间模型	8	87	269.1	2.4
	12	184	606.9	2.8
	16	277	975.1	2.7
	20	568	1 578.5	2.9
层状半空间锥体模型	8	70	205.8	1.8
	12	162	510.5	2.3
	16	244	838.2	2.3
	20	516	1 400.1	2.5

3.2.2 采用 2 种模型计算结果的比较 采用 A. S. Veletsos 提出的粘弹性均质半空间模型, 使用 Matlab 7.0 编制计算程序, 计算弯剪型钢筋混凝土框架剪力墙结构的位移响应。计算频率间隔 $\Delta\omega$ 取 0.05 总共取 1 000 个样点, 这样最大频率可达 8 Hz。然后分别采用层状半空间锥体模型, 重新对上述结构进行风振动力响应计算。图 4 给出采用考虑 7 层地基土介质的层状半空间模型时结构的顺风向响应, 与采用粘弹性均质半空间地基模型时计算的结果。

将采用粘弹性均质半空间模型与层状半空间锥体模型计算的结果进行比较, 采用前者比后者计算得出的结果大, 在楼层较低时, 两者差别相对较大, 但随着楼层总数的增加两者之间的差别逐渐减小, 结构为 8 层时顶层控制质点处响应值之间的差别在 19.54%, 而结构为 20 层时, 差别为 9.15%。由于 8 层到 20 层结构的层间刚度取为相同值, 对于较低的结构, 相对刚度大于真实的结构, 因此 8 层结构的响应失真, 随着楼层的增高, 结构响应逐渐接近真实值。以上计算结果表明,

采用均质半空间模型计算的结果与层状半空间的结果相差在 10% 左右, 在工程中还是可以接受的, 但偏于保守, 而层状半空间锥体模型比较精确, 但计算复杂且计算量比前者大很多, 适合用于研究。

4 结论

对于采用箱型基础或刚度较大筏板基础的钢筋混凝土高层建筑, 考虑 SSI 时, 通过对采用不同地基模型时结构的风振响应分析计算对比, 可以得出如下的结论:

(1) 在高层建筑风振响应分析时考虑 SSI 层状场地地基土的材料阻尼比取值也很小, 一般不超过 3%。因此地基土仅消耗总振动能量中很小一部分。SSI 对高层建筑的风振响应并不一定有利。

(2) 在高层建筑风振响应分析时考虑 SSI 采用层状半空间地基模型时, 随着考虑的地基土层数的增加, 计算的结果趋于精确值, 一般考虑 7 层土介质已经可以基本满足要求。

(3)在高层建筑风振响应分析时考虑SSI采用粘弹性均质半空间模型比层状半空间模型计算的结果大,偏于保守,但后一种模型比较复杂,计算量大。因此,在实际的工程中对于较高的结构可以采用粘弹性均质半空间地基模型代替锥体层状半空间模型。

本文只讨论了明置基础高层风振响应时的地基土材料阻尼比,对有埋置基础及桩基的高层建筑风振时地基土及材料阻尼比问题可采用类似的方法求得。

参考文献:

[1] 张相庭. 结构风压和风振计算 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1985

[2] 陈 镨, 薛松涛, 王远功, 等. 土-结构相互作用对结构风振响应的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003 22(2): 309-315

[3] Nakamura N A practical method for estimating dynamic soil stiffness on surface of multi-layered soil [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics 2005 34 1391-1406

[4] 张剑寒. 层状地基上块式基础地基阻抗函数简化计算方法的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006

[5] Veletsors A S Verfic B Vibration of viscoelastic foundation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1973 2(1): 87-102

[6] 谢定义. 土动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988

(上接第 12页)

定义 11: 拓扑空间中对于点的局部 θ -连通关系而言的每一等价类, 均称为 X 的局部 θ -连通分支。

推论 2 设 (X, T) 为拓扑空间, 则

- (1) 拓扑空间 X 的每一个局部 θ -连通分支均非空集;
- (2) X 的不同的局部 θ -连通分支不交;
- (3) X 为其所有局部 θ -连通分支之并;
- (4) $x, y \in X$ 属于 X 的同一个局部 θ -连通分支的充要条件是 x, y 为局部 θ -连通的。

证明: (1) 设 (X, T) 为任一拓扑空间, C 是 X 中的任一局部 θ -连通分支, 由定义 11 可知, C 中每一个成员均为局部 θ -连通集, 设 $A \in C$ 即 A_1 为局部 θ -连通集, 由 C 为 A_1 的等价类, 由等价类的定义可知, C 中至少含有一个成员 A_1 , 从而 C 非空。

(2) 若 B 为局部 θ -连通分支, C 也是局部 θ -连通分支; 假设 $B \in B, C \in C (i=1, 2, \dots)$, 且 $B \neq C$ 若任意的 $A \in B$ 且 $A \in C$ 则 $A \in B \cap C \Rightarrow$

$B = C (i=1, 2, \dots, n)$ 与假设矛盾, 故 X 的不同的局部 θ -连通分支不交。

(3) 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 记 $[x_1], [x_2], \dots, [x_n], \dots$ 分别为不同的局部 θ -连通分支, 故 X 为其所有局部 θ -连通分支之并。

(4) 设 X 是一个拓扑空间, $x, y \in X$ 如果 X 中有一个局部 θ -连通子集同时包含 x 和 y 则称 x 与 y 是局部 θ -连通的。 $x, y \in X$ 也属于 X 的一个局部 θ -连通分支。

参考文献:

[1] 许兆龙. θ -连通空间与 θ -连通 [J]. 韶关学院学报, 2002 (6): 17-24

[2] 熊金城. 点集拓扑讲义 (第 2 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998

[3] 熊金城. 点集拓扑讲义 (第 3 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003

[4] 张喜贵. 局部道路连通空间 [J]. 通化师范学院, 2002 (5): 14-17