

土-结构相互作用对基础隔震体系的影响

李海岭

葛修润

(中国公路工程咨询监理总公司) (中科院武汉岩土力学研究所)

摘要 本文应用子结构法,分析了土-结构相互作用对线性基础隔震体系基频和结构反应的影响。分析模型中,上部结构取为具有埋置刚性基础的均质剪切梁式模型,地基取为均质、各向同性的粘弹性半空间。上部结构和刚性基础之间设置隔震层。通过对隔震体系反应的传递函数及基于FFT的地震时程反应的分析,讨论了地基土柔性、基础埋深和隔震层刚度对于基础隔震体系基频和结构反应的影响。

关键词 土-结构相互作用, 基础隔震, 粘弹性半空间

中图分类号: TU352.1⁺² **文献标识码:** A

文章编号: 1000-131X (2001) 04-0083-05

1 前言

基础隔震作为一种有效的被动控制方式广泛地应用于包括建筑结构、桥梁、核电站等工程领域中。关于基础隔震的理论和应用研究日益成熟,文献[1, 2]对于基础隔震的理论和应用成果进行了总结。基础隔震通过调整结构的振动周期,避开地震的卓越周期来减小结构的加速度反应,并通过隔震系统的阻尼吸收地震传入的能量,从而控制结构的位移反应。对于基础隔震体系,通常在理论分析中,忽略土-结构相互作用 (SSI)。然而,SSI在以下三方面对隔震体系的隔震机理产生直接影响:(1)考虑相互作用时,体系将比底部固定的隔震体系更柔,隔震体系振动周期将不同于原体系;(2)辐射阻尼(部分振动能量通过无限地基散逸相应于阻尼的存在)将改变体系的阻尼特性;(3)埋置基础使基底入射地震波将由自由场输入变为散场输入。因此,SSI对隔震系统的影响程度值得探讨。M.C.Constantinou和M.Kneifati^[3]对具有基础隔震系统的单自由度上部结构-表面基础体系进行了分析,以体系基频的变化程度作为判别SSI对隔震体系的影响标志。M.Novak和P.Henderson^[4]采用固定的动力刚度,对多层剪切结构研究了隔震器的转动对隔震体系模态特性的影响。

本文将上部结构简化为具有埋置刚性基础的均质剪切梁,考虑了运动相互作用的影响;地基取为均质各向同性的粘弹性半空间,基础与上部结构之间设置隔震层。首先,由子结构法推导出具有基础隔震系统

的结构的反应。进而,对于具体算例,通过对隔震体系反应传递函数和基于FFT的时程反应的分析,讨论地基土柔性和基础埋深及隔震层刚度对基础隔震体系隔震效果的影响。

2 理论推导

2.1 上部结构反应

如图1所示,具有埋置刚性基础的均质悬臂剪切梁式结构底部设置隔震系统,地基取为均质、各向同性的粘弹性半空间。其中 m_0 、 k_0 、 v_0 分别为隔震系统的附加底板质量、刚度系数和复阻尼系数; m 、 k 、 v 分别为上部结构单位长度的质量、剪切刚度和复阻尼系数; H 和 h_0 分别为上部结构高度和隔震层高度, h 为基础埋深。

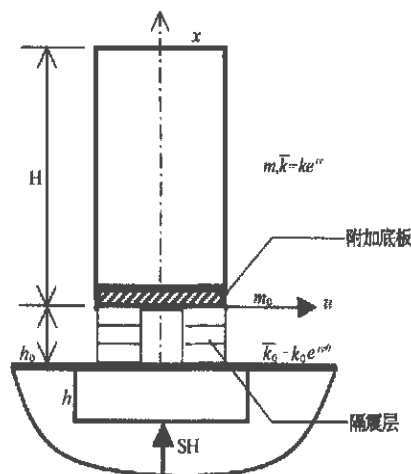


图1 计算模型

在圆频率为 ω 的稳态简谐地震波 $u_g(\omega)e^{i\omega t}$ 作用下,各反应量均存在共同的时间因子 $e^{i\omega t}$ 。剪切梁

式上部结构的运动方程为

$$u''(x) + (\omega/\bar{c})^2 u(x) = 0 \quad (0 < x < H) \quad (1)$$

式中, $\bar{c} = ce^{i\nu/2}$, $c = \sqrt{k/m}$ 为结构的剪切波速, $u(x)$ 为上部结构的水平位移, 且

$$u(x) = u_b + (h_0 + x)\theta_b + u_R(x) \quad (2)$$

式中, u_b 为基础顶面的水平位移, θ_b 为基础的转动位移, $u_R(x)$ 为上部结构相对于基础顶面的水平位移。其边界条件为

$$\begin{cases} k \frac{d u_R(x)}{d x} \Big|_{x=H} = 0 \\ -m_0 \omega^2 u(0) + k_0 u_R(0) - k \frac{d u_R(x)}{d x} \Big|_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

方程 (1) 的解为

$$u(x) = \frac{1}{\Delta} \left[\Delta_1 \cos \frac{\omega x}{\bar{c}} + \Delta_2 \sin \frac{\omega x}{\bar{c}} \right] \quad (4)$$

其中, $\delta = \frac{\omega H}{\bar{c}}$, $\bar{\omega}_0^2 = \frac{k_0}{m_0} = \omega_0^2 e^{i\nu_0/2}$; $\Delta = \left[1 - \frac{\omega^2}{\bar{\omega}_0^2} \right] -$

$$\Gamma \delta \operatorname{tg} \delta, \Delta_1 = u_b + \left[\Gamma \frac{1 - \cos \delta}{\cos \delta} + \beta \right] H \theta_b, \Delta_2 = u_b \operatorname{tg} \delta + \left[\frac{1}{\delta \cos \delta} \left(1 - \frac{\omega^2}{\bar{\omega}_0^2} \right) + (\beta - \Gamma) \operatorname{tg} \delta \right] H \theta_b; \Gamma = \frac{k}{k_0 H}$$

为上部结构与隔震层刚度比; $\beta = \frac{h_0}{H}$ 隔震层与上部结构高度之比。

基础顶面的剪力和弯矩分别为

$$F_b = \omega m \bar{c} (\operatorname{tg} \delta) \alpha_{11} u_b + m \bar{c}^{-2} \frac{(1 - \cos \delta)}{\cos \delta} \alpha_{12} \theta_b \quad (5)$$

$$M_b = m \bar{c}^{-2} \frac{(1 - \cos \delta)}{\cos \delta} \alpha_{21} u_b - m \bar{c}^{-2} \left[\frac{H}{L} \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\delta}{\delta} \right) \right] \alpha_{22} (L \theta_b) \quad (6)$$

式中, 隔震层质量与上部结构总质量之比 $\mu = \frac{m_0}{mH}$, $\alpha_{11} = \frac{1}{\Delta} \left[1 + \mu \frac{\delta}{\operatorname{tg} \delta} \right]$, $\alpha_{21} = \frac{1}{\Delta} \left[1 + \frac{\beta \delta (\operatorname{tg} \delta + \mu \delta) \cos \delta}{1 - \cos \delta} \right]$, $\alpha_{12} = \frac{1}{\Delta} \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\bar{\omega}_0^2} + \Gamma \mu \delta^2 \right) + \beta \delta \left[\sin \delta + \frac{\cos \delta (\sin \delta + \mu \delta)}{1 - \cos \delta} \right] \right]$, $\alpha_{22} = \frac{1}{\Delta} \left\{ 1 - \frac{\omega^2}{\bar{\omega}_0^2} - \left[\frac{1 - \cos \delta}{\cos \delta} \right] \left[\beta \left(1 - \frac{\omega^2}{\bar{\omega}_0^2} \right) + \Gamma \left(\beta \mu \delta^2 - 2 + \frac{\delta \sin \delta}{1 - \cos \delta} \right) + \beta \cos \delta - \frac{\beta \cos \delta}{1 - \cos \delta} (\beta \operatorname{tg} \delta + \sin \delta \operatorname{tg} \delta + \beta \mu \delta^2) \right] \right\} \left(1 - \frac{1}{\delta} \operatorname{tg} \delta \right)$

未设隔震层时, 上部结构位移位移为

$$u(x) = [\cos(\bar{\omega} x) + \operatorname{tg} \delta \sin(\bar{\omega} x)] u_b + \left[\left[\frac{\bar{c}}{\omega L} \right] \frac{\sin(\bar{\omega} x)}{\cos \delta} \right] (L \theta_b) \quad (7)$$

式中, $\delta = \omega H/\bar{c}$, $\bar{x} = x/H$ 。相应的基础顶面的剪力

和弯矩为式 (5)、(6) 中 α_{11} , α_{12} , α_{21} , α_{22} 取 1。

2.2 土-结构动力相互作用

刚性基础的运动方程 (对于基础底面中心)

$$-\omega^2 [M_b^0] \{U_b^0\} = \{F_b^0\} - \{F_s^0\} \quad (8)$$

式中, $\{U_b^0\} = (u_0, L\theta_0)^T$ 为基础底面中心 o 的广义位移向量, $\{F_b^0\} = (F_b^0, M_b^0/L)^T$ 和 $\{F_s^0\} = (F_s^0, M_s^0/L)^T$ 分别为结构和地基作用在基础上的广义力向量。广义质量矩阵由下式确定

$$[M_b^0] = [A]^T \begin{bmatrix} m_F & 0 \\ 0 & I_F \end{bmatrix} [A] \quad (9)$$

式中, $[A] = \begin{bmatrix} 1 & h/2L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, m_F, I_F 分别为基础质量和对于质心的转动惯量; $2L$ 为基础宽度。

由方程 (5)、(6) 可得隔震和未隔震时结构作用在基础顶面的广义力向量 $\{F_b\} = (F_b, M_b/L)^T$ 和基础顶面广义位移向量 $\{U_b\} = (u_b, L\theta_b)^T$ 之间的关系

$$\{F_b\} = -G_s L [K_b(\omega)] \{U_b\} \quad (10)$$

式中, $G_s = \rho_s c_s^2$ 为土的剪切模量, ρ_s, c_s 分别为土的密度和剪切波速。

将基础顶面和底面的广义力和广义位移之间的关系 $\{F_b^0\} = [A]^T \{F_b\}$, $\{U_b\} = [A] \{U_b^0\}$ 代入方程 (10) 中, 得

$$\{F_b^0\} = -G_s L [K_b^0(\omega)] \{U_b^0\} \quad (11)$$

式中, $[K_b^0(\omega)] = [A]^T [K_b(\omega)] [A]$ 。

地基作用在基础底面中心处的广义力为

$$\{F_s^0\} = G_s L [K_s^0(\omega)] (\{U_b^0\} - \{U_0^*\}) \quad (12)$$

将方程 (11)、(12) 代入方程 (8) 中, 整理得基础底面广义位移

$$\{U_b^0\} = \left\{ [I] + [K_s^0(\omega)]^{-1} ([K_b^0(\omega)] - a_0^2 [M_b^0] / (\rho_s L^3)) \right\}^{-1} \{U_0^*\} \quad (13)$$

其中, 无量纲频率参数 $a_0 = \omega L/c_s$; $[K_s^0(\omega)]$ 为地基的动力刚度矩阵; $\{U_0^*\} = (u_0^*, L\theta_0^*)^T$ 为基础底面中心处地基土的散场运动, 它与自由场运动 $u_g(\omega) \times e^{i\omega t}$ 存在如下关系

$$\{U_0^*\} = (s(a_0), r(a_0))^T u_g(\omega) \quad (14)$$

式中, $s(a_0), r(a_0)$ 为散射系数, 取值由无量纲频率 a_0 参数及基础特性决定。

2.3 隔震层参数

定义隔震度 $I = T_b/T$ 。其中, $T = \frac{4H}{c}$ 为基底固定时, 上部结构第一自振周期 (不计 SSI); $T_b = \frac{2\pi}{\sqrt{k_0/M_T}}$ 为设置隔震层后, 上部结构假设为刚体运动

时的振动周期 (不计 SSI)。隔震度是隔震层延长隔震体系振动周期程度的度量, 隔震层刚度越小, 隔震度越大。 $M_T = mH(1 + \mu)$, 则上部结构与隔震层刚度比由隔震度表示为 $\Gamma = \frac{4I^2}{\pi^2(1 + \mu)} e^{i(v-v_0)}$, 且 $\omega_0 = \frac{\pi c}{2IH}(1 + 1/\mu)^{1/2}$ 。

2.4 时程分析

由频率传递函数 $H_y(\omega)$, 通过傅立叶变换可得 $y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H_y(\omega) U_g(\omega) e^{i\omega t} d\omega$ 。当地震记录为加速时, $U_g(\omega) = -\frac{1}{\omega^2} \ddot{U}_g(\omega) = -\frac{1}{\omega^2} \int_0^{T_a} \ddot{u}_g(t) e^{-i\omega t} dt$, T_a 为地震波的记录时段。

3 算例与结果分析

考虑 10 层结构 (高 $H=37.5\text{m}$) 和 3 层结构 (高 $H=10\text{m}$), 基础外部尺寸为 $2L \times 2L \times h$ 。上部结构和基础的有关参数列于表 1。地基土取为均质的粘弹性半空间, 其泊松比 $\nu_s=1/3$, 即 P 波和 S 波的波速之比 $\alpha_s/\beta_s=2$; 对于 P 波和 S 波的阻尼比分别为 $\xi_\alpha=0.0005$, $\xi_\beta=0.001$ 。散射系数和地基的动力刚度可参阅文献 [5]。考虑地基土剪切波速为 100, 200, 300, ∞ , 分别相应于软土、中软、中硬土和刚性地基。10 层结构取隔震度 $I=1.5, 2.0, 3$ 层低矮结构 $I=6.0$,

8.0. 地震波应用 EL-CENTRO NS 分量和天津波。

表 1 结构和基础参数

参数名称	参数符号	参 数 值	
		10 层	3 层
结构基本自振周期	T_1 (s)	1.0	0.27
结构复阻尼系数	ν	0.06	0.04
隔震层复阻尼系数	ν_0	0.14	0.14
结构剪切波速	c (m/s)	150.0	150.0
结构质量比	$mH/\rho_s L^2 H$	1.0	1.0
隔震层与结构总质量比	μ	0.1	0.3
基础宽度	$2L$ (m)	20.0	20.0
隔震层与结构高度比	$\beta=h_0/H$	0.01	0.03
基础质量比	$m_F/\rho_s L^3$	0.90/0.70/0.45	0.070
基础转动惯量比	$I_F/\rho_s L^5$	0.50/0.35/0.25	0.035
基础埋深比	h/L	0.66/0.50/0.33	0.0

表 2 给出了隔震结构基本周期。图 2、图 3 为 10 层结构顶部相对位移传递函数 $|u_R(H)/u_g|$ 和基础顶面剪力的无量纲传递函数 $|F_b/-i\omega m c u_g|$ 。图 4 为 3 层结构顶部相对位移传递函数 $|u_R(H)/u_g|$ 和基础顶面剪力的无量纲传递函数 $|F_b/-i\omega m c u_g|$ 。

表 2 隔震结构基本周期 T_1 (s)

	$\xi_s^*=100$ 1.5/	$\xi_s^*=200$ 1.5/	$\xi_s^*=300$ 1.5/	$\xi_s^*=\infty$ 1.5/
10 层 $h/L=1/3$	2.0 1.96/2.44	2.0 1.94/2.36	2.0 1.89/2.28	2.0 1.51/2.01
1/2	1.93/2.41	1.88/2.31	1.85/2.25	1.51/2.01
2/3	1.92/2.38	1.85/2.27	1.82/2.22	1.51/2.01
3 层 $I=6.0/8.0$	1.69/2.22	1.64/2.17	1.63/2.16	1.62/2.15

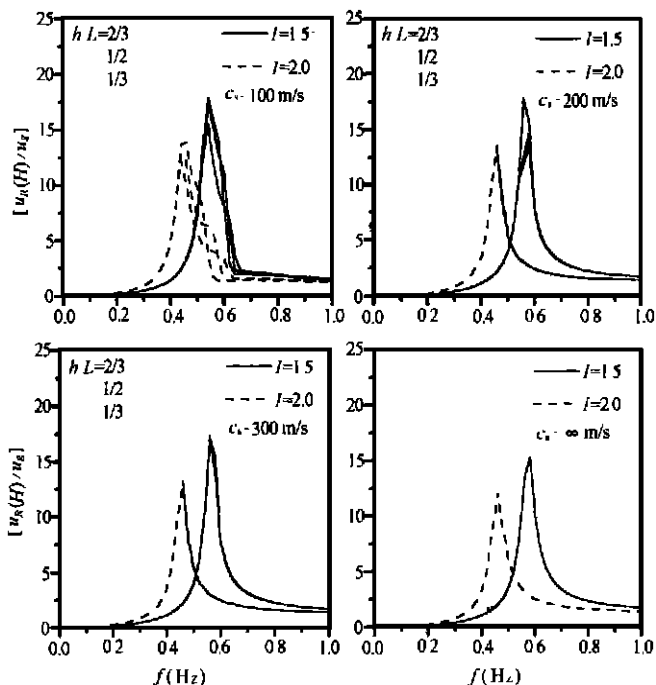


图 2 结构顶部相对位移传递函数 $|u_R(H)/u_g|$

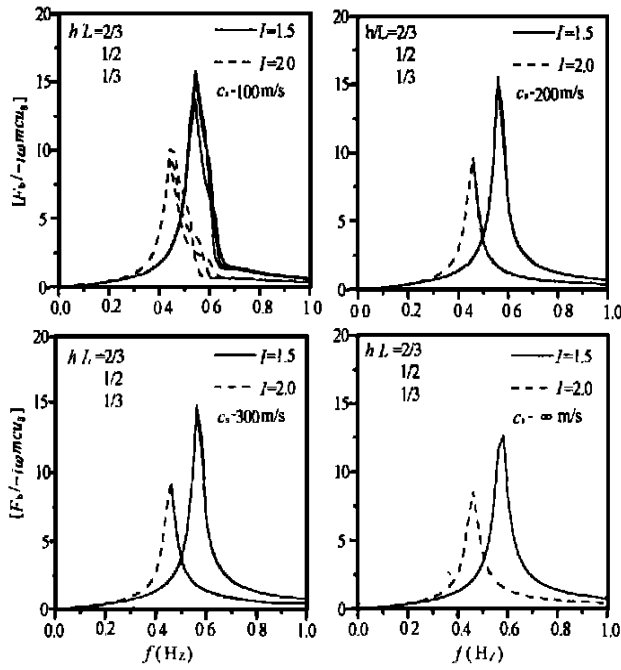


图3 基础顶面剪力的无量纲传递函数 $|F_b / -i\omega m c u_g|$

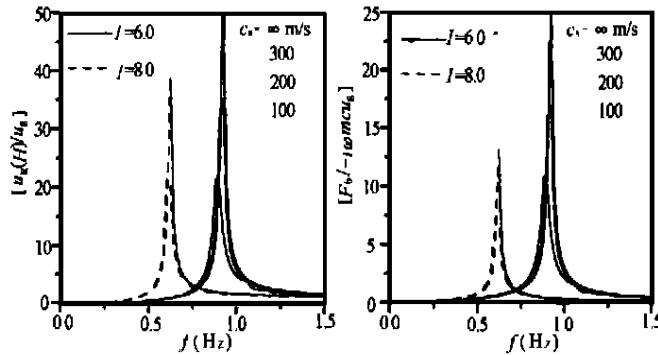


图4 三层结构顶部相对位移传递函数 $|u_R(H) / u_g|$ 和基础顶面剪力的无量纲传递函数 $|F_b / -i\omega m c u_g|$

从表2看出，埋深比增大使隔震结构体系基本周期 T_1 略减；同一埋深比，相互作用使 $T_1(c_s = 100)$ 比 $T_1(c_s = \infty)$ 在 $I = 1.5$ 时增加 27%， $I = 2.0$ 增加 18%。隔震度增加，相互作用对隔震体系 T_1 影响减小。

图2、图3表明，对于高柔结构，相互作用使隔震结构反应第一峰值增加，体系基频减小。相互作用较强烈（地基土剪切波速较小）时，埋深增大使结构反应增大，相互作用较弱时，埋深对结构反应影响减小。隔震度增大，结构反应减小，隔震度较小时，埋深对结构反应影响较大。

图4表明，对于低矮结构，相互作用使隔震结构反应第一峰值反应减小，体系基频减小。隔震度增大，结构第一峰值反应减小，相互作用对结构反应影

响减小。

图5为 EL-CENTRO 波 NS 分量和天津波作用下，结构顶部相对位移反应时程。表3给出了各种情况下基础顶面剪力。图5和表3表明，隔震结构反应与结

表3 结构基底剪力的最大值 $|F_b / mH|$ (单位: m/s^2)

			$c_s=100$	$c_s=200$	$c_s=300$	$c_s=\infty$
10层	EL-波	$h/L=1/3$	1.260	1.332	1.438	1.287
		1/2	1.256	1.404	1.437	1.287
		2/3	1.237	1.428	1.426	1.287
	天津波	$h/L=1/3$	1.906	1.606	1.923	1.844
		1/2	2.008	1.834	1.970	1.844
		2/3	1.988	1.946	1.999	1.844
3层	EL-波	1.424	1.498	1.809	1.764	
	天津波	2.823	1.994	1.966	2.028	

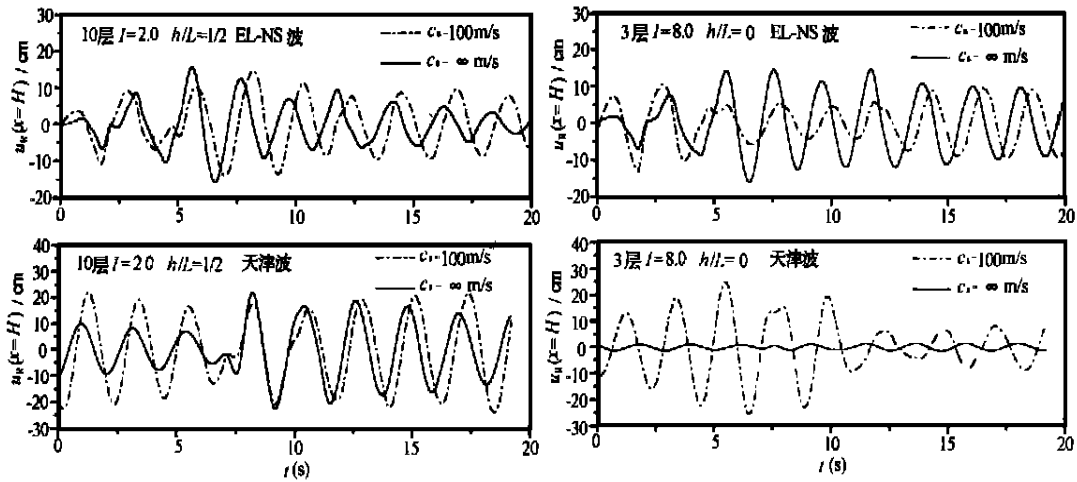


图5 结构顶部相对位移反应时程

构特性、隔震层刚度、基础埋深、地基土柔度及地震波的具体频谱特性有关。考虑相互作用后，隔震结构反应可能大于刚性地基假定，因此，基于刚性地基假定的隔震结构设计并不能保证隔震结构达到设计效果。

4 结 论

基于FFT的结构地震时程反应分析表明：考虑相互作用后，隔震结构反应可能大于刚性地基假定，因此，基于刚性地基假定的隔震结构设计并不偏于安全。

参 考 文 献

- 1 Kelly J M·Aseismic base isolation: review and bibliography·Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1986, 5 (4): 202~216
- 2 Skinner R I·工程隔震概论·北京:地震出版社, 1996
- 3 Constantinou M C and Kneifati M·Dynamics of soil-base-isolated-structure systems·J·Struc·Engrg·ASCE, 1988, 114 (1): 211~221.
- 4 Novak M and Hendreson P·Base-isolated building with soil-structure interaction·EESD, 1989, 18 (6): 751~765
- 5 Mita A and Luco J E·Impedance functions and input motion for imbedded square foundations·J·Geotech·Engrg·, ASCE, 1989, 115 (4): 491~503

EFFECT OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION ON BASE-ISOLATED BUILDING SYSTEM

Li Hailing

(China Highway Engineering Consulting and Supervision General Corporation)

Ge Xiurun

(Institute of Rock & Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The effect of the soil-structure interaction on the dynamic behavior of a base-isolated system is studied. It is analyzed by the substructure approach. The superstructure is modeled as a uniform shear beam supported on a rigid foundation. An isolated layer is set between the superstructure and the rigid foundation. The foundation is imbedded in the soil. That is represented by a uniform visco-elastic half space. Moreover, the influences of the soil flexibility, the foundation depth, and the stiffness of an isolated layer on the dynamic behavior are discussed. It is based on investigating the transfer function of the structure response to seismic input and the seismic time history response by FFT algorithm.

Key words: soil-structure interaction, base-isolated, visco-elastic half space

李海岭 工程师，博士。从事结构振动控制及岩土工程的研究工作。发表学术论文9篇，通讯地址：100096 北京市海淀区西三旗东高新建材城7层 北京华路达工程咨询有限公司

葛修润 中国工程院院士，中科院武汉岩土力学研究所研究员，长期从事岩土工程及地下工程的研究工作。