

盛朝晖,曹野,张童心.基于线性流变模型的基础隔震系统的动力特性研究[J].地震工程学报,2018,40(4):728-733.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.728

SHENG Zhaohui, CAO Ye, ZHANG Tongxin. Dynamic Characteristics of the Base Isolation System Based on the Linear Rheological Model[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 728-733. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.728

基于线性流变模型的基础隔震系统的动力特性研究

盛朝晖¹, 曹 野², 张童心¹

(1. 河北工程大学土木学院, 河北 邯郸 056021; 2. 中国黄金集团建设有限公司, 北京 100012)

摘要: 为了更准确地分析基础隔震系统的动态响应和隔离能力, 构建服从 Hooke 定律、Kelvin/Voigt 定律的线性流变模型, 采用 1977 年罗马尼亚地震的数据资料, 对该模型进行动力特性的理论分析和实验研究, 然后建立相关参数的表达式, 发现各参数受到黏性阻尼系数 c 的离散变化和角速度 ω 的连续变化影响较大。通过与实验对比发现所建立表达式是正确的。可以通过最大传递力 Q_0 和运动传递率 T 来评估系统的动态隔离能力。

关键词: Hooke 定律; 基础隔震系统; 线性流变模型; 抗震装置; 动态响应; 隔离能力

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)04-0728-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.728

Dynamic Characteristics of the Base Isolation System Based on the Linear Rheological Model

SHENG Zhaohui¹, CAO Ye², ZHANG Tongxin¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056021, Hebei, China;

2. China National Gold Engineering Corporation, Beijing 100012, China)

Abstract: A linear rheological model obeying Hooke's law and Kelvin/Voigt's law was constructed in this study to ensure accurate analysis of the dynamic response and isolation capability of the base isolation system. Theoretical analysis and an experimental study of the dynamic characteristics of the model were conducted using the data of the 1977 Romanian earthquake. Then, the expressions of relevant parameters were established. The results show that the parameters are significantly influenced by the discrete variation of the viscous damping coefficient c and the continuous change of angular velocity ω . By comparing the experimental results, we determine that the established expressions are accurate. The dynamic isolation capability of the system can be evaluated using the maximum transfer force Q_0 and movement transmissibility T .

Keywords: Hooke's law; base isolation system; linear rheological model; seismic device; dynamic response; isolation ability

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378169)

第一作者简介: 盛朝晖(1969—), 女, 江苏无锡人, 博士, 讲师, 研究方向: 结构抗震设计与防灾减灾工程。

E-mail: shengzh407@163.com.

0 引言

世界各地频发的地震,给建筑物抗震提出了越来越高的要求。为了保护人身安全,减少地震带来的损失和伤害,建筑抗震技术越来越受到重视^[1]。随着科技的高速发展,建筑抗震技术取得了很大的进步,各种抗震设备层出不穷,其中基础隔震系统的应用更为广泛^[2]。

基础隔震是通过在建筑物底部与基础顶面之间安装隔震消能装置,以增加建筑结构的变形能力与滞变阻尼^[3]。而对于桥梁、高架桥等建筑的抗震而言,解决的技术方案是提高其隔离能力和对地震能量的耗散能力,通常采用的抗震设备具有弹性和流体耗散能力,并对组件选择进行系统分析。因此最可靠和合理的方法是建立参数分析关系,以评估地震对基本频谱分量动力学激励动态响应的可能性。本文构建服从 Hooke 定律、Kelvin/Voigt 定律的线性流变模型,对此进行理论分析和实验研究。

该模型系统的刚度和阻尼特性是由共振动态隔离准则确定的,同时考虑了地震的拐角周期 T_c 和周期 T 。

本文计算数据是从 1977 年罗马尼亚的地震数据中选取的基本数据分量^[4]。在地震运动的水平作用方向上,加速度采用的是基本频谱分量, $a = \omega^2 X_0 \sin \omega t$, 其中: X_0 是地面的水平位移, ω 是地震运动的角速度,周期 $T = \frac{\omega}{2\pi}$ 。

本文分析采用的数值: $T = 2 \text{ s}$, $F = 0.5 \text{ Hz}$, $\omega = \pi \text{ rad/s}$, $a = 3 \text{ m/s}^2$, $X_0 = 0.28 \text{ m}$ 。条件假设:

- (1) 考虑结构的刚性行为;
- (2) Hooke-Voigt-Kelvin 黏弹性系统的线性行为;
- (3) 考虑绝对坐标系统的刚性平移运动。

由黏弹性系统和弹性系统组成的 Hooke-Voigt-Kelvin 动态线性模型,其基础隔离是通过便于布置的抗震设备来实现的^[5](图 1)。主要包括弹性装置和流体耗散装置,其中弹性常数为 k , 弹簧刚度为 Nk (其中 N 是正实数),黏性阻尼常数为 c 。

1 相对瞬时位移的动态系统响应

本文所研究的案例和绘制响应参数变化曲线的初始数据如下: $m = 3M \text{ kg}$, $k = 4.8M \text{ N/m}$; $N = 10$; $c = (1.5; 2; 3; 4; 5) \text{ MN} \cdot \text{s/m}$; $a = 3 \text{ m/s}^2$, $\omega = \pi \text{ rad/s}$, $X_0 = 0.28 \text{ m}$ 。

坐标系定义如下:固定标记 O_1 与静止轴 $O_1 X$ 连接,定义为绝对运动的坐标;与地面相连的标记 $O(x_0)$ 在水平方向 OX 上定义为由地震产生的运动的坐标。

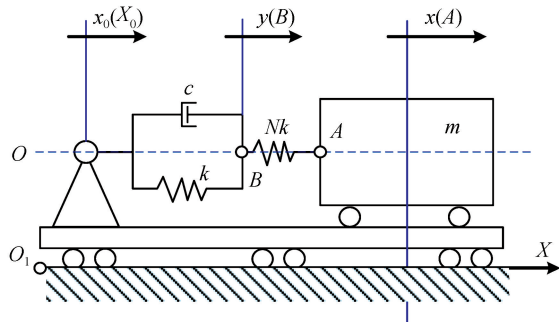


图 1 Hooke-Voigt-Kelvin 动态线性模型

Fig.1 Hooke-Voigt-Kelvin dynamic linear model

点 A 和 B 的相对运动是由水平瞬时位移和移动标记 $O(x_0)$, 即 $x(t)$ 和 $y(t)$ 来确定的。 $O(x_0)$ 表示地震过程中基本频谱分量的地面运动位移: $x_0 = X_0 \sin \omega t$ 。

假设 $x_0 > y > x$, 则质量 m 的运动微分方程为:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = Nk(y - x) \\ c(\dot{x}_0 - \dot{y}) + k(x_0 - y) = Nk(y - x) \end{cases} \quad (1)$$

与虚数单位 $i = \sqrt{-1}$ 的复合表达式:

$$\begin{cases} m \cdot x' + Nkx' - Nky' = 0 \\ c(\dot{x}_0 - \dot{y}') + k(x' - y') - Nk(x' - y') = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x'_0 = X_0 e^{i\omega t}$; $x' = A' e^{i\omega t}$, $A' = A e^{i\theta_2}$; $y' = B' e^{i\omega t}$, $B' = B e^{i\theta_1}$ 。

通过在式(2)中取代与时间有关的复杂度量及其衍生物,得到

$$\begin{cases} (-m \cdot \omega^2 + Nk)A' - Nkx' - NkB' = 0 \\ NkA' - (ic\omega + k + Nk)B' = -(ic\omega + k)X_0 \end{cases} \quad (3)$$

基础系统的决定因素 D 为:

$$D = -[Nk^2 - km\omega^2(1 + N)] - ic\omega(Nk - m\omega^2) \quad (4)$$

令

$$\gamma = Nk^2 - km\omega^2(1 + N) \quad (5)$$

$$\delta = c\omega(Nk - m\omega^2) \quad (6)$$

则

$$D = -\gamma - i\delta \quad (7)$$

又令

$$\alpha = Nk - m\omega^2 \quad (8)$$

$$\beta = c\omega \quad (9)$$

则

$$\gamma = k(\alpha - m\omega^2 N) \quad (10)$$

$$\delta = \alpha\beta \quad (11)$$

在式(3)中,得到幅度 A' :

$$A' = -X_0 Nk \frac{k + i c \omega}{\gamma + i \delta}$$

或

$$A' = -X_0 Nk \frac{1}{\gamma^2 + \delta^2} [(k\gamma + c\omega\delta) - i(k\delta - c\omega\gamma)] \quad (12)$$

从式(12)得到瞬时位移幅值 $x(t)$:

$$|A| = -X_0 Nk \sqrt{\frac{k^2 + c^2 \omega^2}{\gamma^2 + \delta^2}} \quad (13)$$

或

$$|A| = A(c, \omega) = X_0 Nk \cdot$$

$$\sqrt{\frac{k^2 + c^2 \omega^2}{[Nk^2 - km\omega^2(1+N)]^2 + c^2 \omega^2 (Nk - m\omega^2)^2}} \quad (14)$$

$$\text{相移 } \theta_1 \text{ 为: } \tan \theta_1 = \frac{k\delta - c\omega\gamma}{k\gamma + c\omega\delta}$$

$$\text{复振幅 } B' \text{ 可由下式得出: } B' = X_0 \alpha \frac{k + i c \omega}{\gamma + i \delta}$$

或

$$B' = X_0 \frac{\alpha}{\gamma^2 + \delta^2} [(k\gamma + c\omega\delta) - i(c\omega\gamma - k\delta)] \quad (15)$$

利用式(15),获得瞬时位移 $y(t)$ 的振幅 B 和双相位 θ_2 为:

$$B = B = X_0 \sqrt{\frac{\alpha^2 (k^2 + c^2 \omega^2)}{\gamma^2 + \delta^2}} \quad (16)$$

或

$$B = |B| = B(c, \omega) = X_0 \cdot$$

$$\sqrt{\frac{(Nk - m\omega^2)^2 \cdot (k^2 + c^2 \omega^2)}{[Nk^2 - km\omega^2(1+N)]^2 + c^2 \omega^2 (Nk - m\omega^2)^2}} \quad (17)$$

通过式(14)和式(17),得到幅度比 B/A 为:

$$\frac{B}{A} = \frac{N - \Phi^2}{N} \quad (18)$$

$$\text{式中: } \Phi^2 = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{m}{k} \omega$$

分析式(18),系统的动态行为如下:

(1) 如果 $N \rightarrow 0$, 则 $B/A \rightarrow \infty$, 这表示幅度 $A \equiv 0$ 。此时弹簧 Nk 的刚度非常低, 即“软弹簧”效应, 可以忽略, 这表示从点 B 到点 A 不能被传送。

(2) 如果 $N \rightarrow \infty$, 则 $B/A \rightarrow 1$, 这表示点 A 和

B 的运动幅度相同。此时弹簧 Nk 的刚度高, 其变形可以忽略不计, 这表示弹性连杆 Nk 为刚性。

(3) 如果 $N = \Phi^2$ 或 $\Phi = \sqrt{N}$, 则 $B/A = 0$, 因此幅度 B 变得很小, 可以忽略不计, 即 $B \equiv 0$ 。此时质量相对于“固定点” B 只在这一点上有联系。

图2为幅度 A 的变化曲线图。通过图2能够看出幅度 $A(c, \omega)$ 的变化与 ω 的连续变化和黏性阻尼常数 c 的离散变化有关。

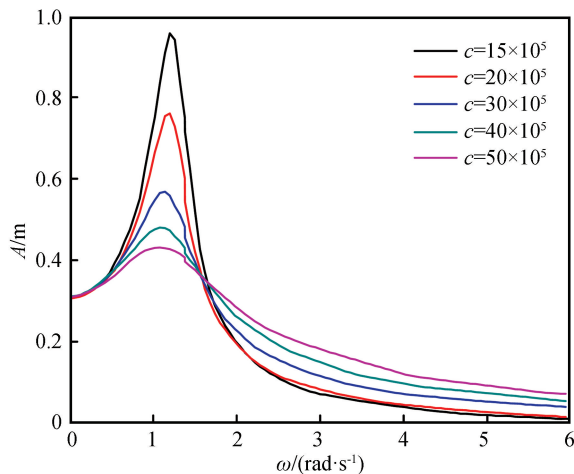


图2 幅度 A 的变化曲线

Fig.2 Change curves of amplitude A

图3为幅度 $B(c, \omega)$ 变化曲线图, 通过图3可以看出幅度 B 变化与 ω 的连续变化和 c 的离散变化有关, 且影响较大。

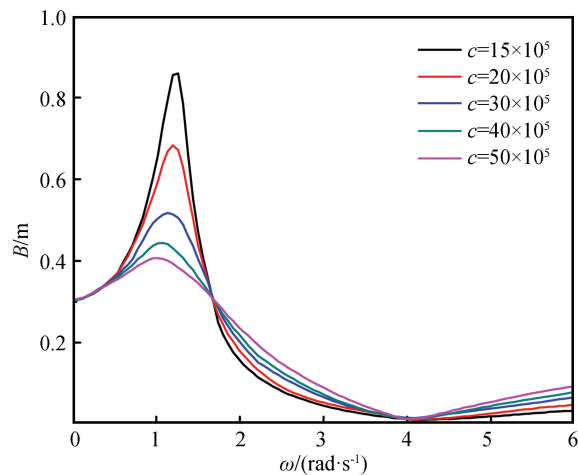


图3 幅度 B 变化曲线

Fig.3 Change curves of amplitude B

2 黏弹性体系的变形

分析了两个系统相互连接时的瞬时变形过程, 即黏弹性系统 Voight-Kelvin 和弹性系统 Hooke。

2.1 黏弹性系统 Voigt-Kelvin

其中 V_1 是黏弹性变形的幅度。则瞬时位移 $x_0(t)$ 和 $y(t)$ 或 x'_0 和 y' 为:

$$v'_1 = x'_0 - y' \tag{19}$$

或

$$V'_1 e^{i\omega t} = X_0 e^{i\omega t} - B' e^{i\omega t}$$

获得:

$$V'_1 = X_0 - B' \tag{20}$$

或者

$$V'_1 = \frac{x_0}{S} k m \omega^2 (-\gamma + i\delta) \tag{21}$$

其中

$$S = \gamma^2 - \delta^2 = [Nk^2 - km\omega^2(1+N)]^2 + c^2\omega^2(Nk - m\omega^2)^2 \tag{22}$$

从式(6)、(7)、(21)和(22)可以得到变形 $V_1(c, \omega)$ 和相移 φ_1 的幅值为:

$$V_1(c, \omega) = X_0 \cdot \sqrt{\frac{km\omega^2}{[Nk^2 - km\omega^2(1+N)]^2 + c^2\omega^2(Nk - m\omega^2)^2}} \tag{23}$$

$$\text{tg}\varphi_1 = -\frac{\delta}{\gamma}$$

或者

$$\text{tg}\varphi_1 = -\frac{c\omega(Nk - m\omega^2)}{Nk^2 - km\omega^2(1+N)} \tag{24}$$

图 4 显示了黏弹性系统的幅度变化,从图中可以看出其幅度变化取决于 c 的离散变化和 ω 的连续变化。

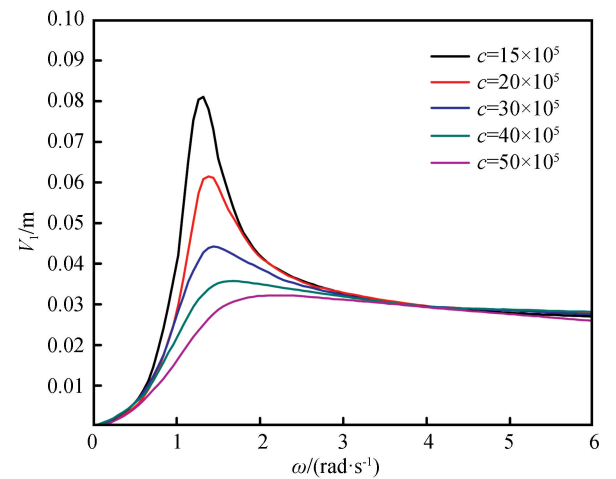


图 4 变形 V_1 的变化曲线

Fig.4 Change curves of deformation V_1

2.2 弹性系统的变形

对于刚度为 Nk 的弹簧,其瞬时弹性形变可表

示为:

$$v'_2 = y' - x' \tag{25}$$

或者

$$v'_2 = B' - A' \tag{26}$$

把 A' 和 B' 代入式(26)中,得到:

$$v'_2 = \frac{X_0}{S} (\alpha - Nk) [(k\gamma + \beta\delta) + i(\beta\gamma - k\delta)] \tag{27}$$

$$\text{tg}\varphi_2 = \frac{\beta\gamma - k\delta}{k\gamma + \beta\delta} \tag{28}$$

由此得到弹性变形的幅度 V_2 和相移 φ_2 ,则 V_2 表达式为:

$$V_2(c, \omega) = (\alpha - Nk) X_0 \sqrt{\frac{k^2 + \beta^2}{\gamma^2 + \delta^2}} \tag{29}$$

联立式(5)、(6)和(10),则式(28)和(29)可以写为:

$$V_2(c, \omega) = -m\omega X_0 \cdot \sqrt{\frac{k^2 + c^2\omega^2}{[Nk^2 - km\omega^2(1+N)]^2 + c^2\omega^2(Nk - m\omega^2)^2}} \tag{30}$$

$$\text{tg}\varphi_2 = -\frac{ck\omega^2 mN}{k^2[Nk - m\omega^2(1+N)] + c^2\omega^2(Nk - m\omega^2)} \tag{31}$$

图 5 给出了最大弹性变量 V_2 的变化,由图可知 V_2 的大小取决于 c 的离散变化和 ω 的连续变化。

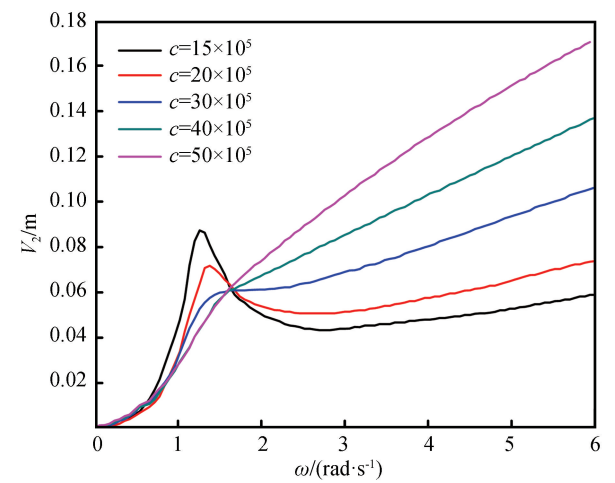


图 5 弹性变形的幅值 V_2 变化曲线

Fig.5 Change curves of the elastic deformation's amplitude V_2

3 动态隔离能力

动态隔离能力评估:

(1) 基础隔震系统在地震运动下朝向具有质量

m 的建筑物的最大传递力 $Q_0^{[6-7]}$;

(2) 建立从移动标记 O 到属于质量 m 的点 A 的运动的传递率 T 的微积分关系,用 $I=1-T$ 的关系计算。

3.1 最大传递力

最大传递力 Q_0 为弹簧区域中具有 Hooke 模拟弹性线(E) 的多重刚度 Nk 的连杆力^[7], 因此其表达式为:

$$Q_0 = NkV_2 \tag{32}$$

将式(28) 代入式(30),得到:

$$Q_0(c, \omega) = km\omega^2 X_0 N \cdot \sqrt{\frac{k^2 + c^2\omega^2}{[Nk^2 - km\omega^2(1 + N)]^2 + c^2\omega^2(Nk - m\omega^2)^2}} \tag{33}$$

图 6 为实验获得的最大传递力 Q_0 的变化曲线图。分析式(33),发现 Q_0 受 c 和 ω 的影响与图 6 中的曲线变化一致,这表示得到的 Q_0 的表达式是正确的。

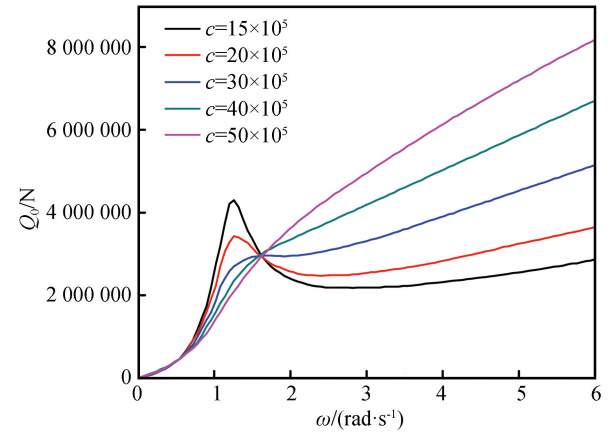


图 6 最大传递力 Q_0 的变化曲线

Fig.6 Change curves of the maximum transfer force Q_0

3.2 动作传递性

使用以下表达式评估从激励点 Q_0 到接收点 $A(x)$ 的运动传递率 $T^{[8]}$ 。

$$T = \frac{A}{x_0} \tag{34}$$

通过如式(12) 中的表达式 A 得到:

$$T(c, \omega) = kN \cdot \sqrt{\frac{k^2 + c^2\omega^2}{[Nk^2 - km\omega^2(1 + N)]^2 + c^2\omega^2(Nk - m\omega^2)^2}} \tag{35}$$

图 7 为实验获得的传递率 T 的变化曲线图。分析式(35),发现 T 受 c 和 ω 的传递率影响与图 7 中的

曲线变化一致,说明得到的 T 的表达式是正确的。

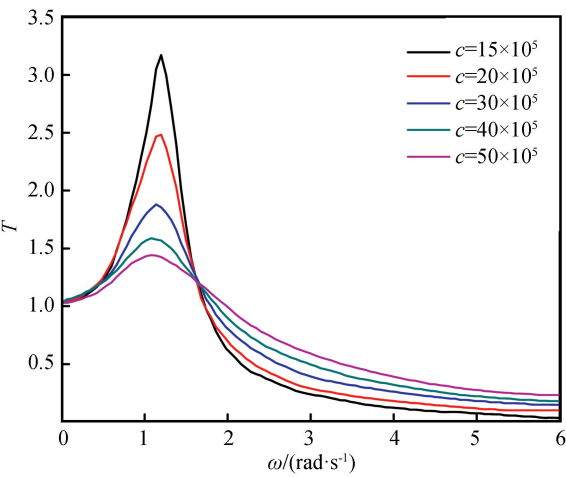


图 7 传递率 T 的变化曲线

Fig.7 Change curves of transmissibility T

4 耗散能量

耗散能量的大小主要由整个黏性流体耗散系统的等效黏滞阻尼常数以及 Voigt-Kelvin 建模的黏弹性系统 V_1 的变形幅度决定^[10-11], 所以耗散能量 W_d 的表达式为:

$$W_d = \pi c \omega V_1^2 \tag{36}$$

将式(21) 代入式(36),得到:

$$W_d(c, \omega) = \pi X_0^2 \cdot \frac{k^2 + m^2 c \omega^5}{[Nk^2 - km\omega^2(1 + N)]^2 + c^2\omega^2(Nk - m\omega^2)^2} \tag{37}$$

图 8 为实验获得的耗散能 W_d 的变化曲线图。分析式(37),发现 W_d 受 c 和 ω 的影响与图 8 中的曲线变化一致。

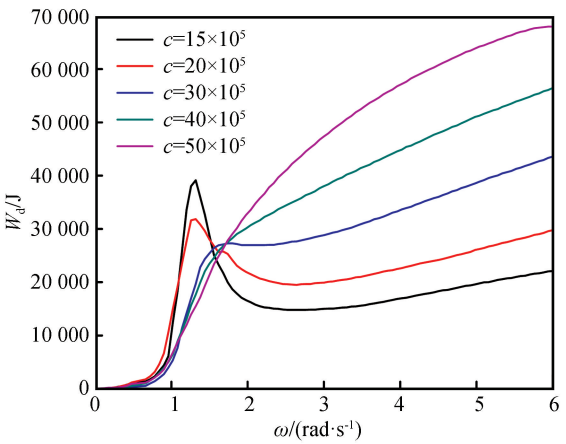


图 8 耗散能 W_d 的变化曲线

Fig.8 Change curves of dissipated energy W_d

5 结论

通过对 Hooke-Voigt-Kelvin 动态线性模型的理论分析和实验研究,得到如下结论:

- (1) 对于给定激励的动态响应由瞬时位移 $x(t) = A \sin(\omega t + \theta_2)$ 表示,其中幅度 $A = A(c, \omega)$,由黏滞阻尼 c 和脉动 ω 的连续变化决定。
- (2) 瞬时变形 $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 对应于黏弹性系统和弹性系统的振幅 V_1 和 V_2 。振幅 $V_1(c, \omega)$ 和 $V_2(c, \omega)$ 的表达式可以评估和计算黏性线性阻尼器 c 上的耗散能 W_d ,所以在具有倍增刚度 Nk 的弹性系统中计算最大传递力 Q_0 。
- (3) 根据 c 的离散变化和 ω 的连续变化,可以采用最大传递力 Q_0 和运动传递率 $T = T(c, \omega)$ 来评估系统的动态隔离能力。

参考文献(References)

[1] 付亮华.基于能量平衡的抗震结构地震反应分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.
FU Lianghua. Seismic Response Analysis of Aseismic Structures Based on Energy Balance[D].Shenyang:Shenyang University of Technology,2013.

[2] 胡金桥,张帆.建筑结构隔震技术现状与应用分析[J].建筑工程技术与设计,2016(7):376.
HU Jinqiao, ZHANG Fan. Present Situation and Application Analysis of Building Structure Isolation Technology[J].Architectural Engineering Technology and Design,2016(7):376.

[3] 余森,岑睿楠.磁流变弹性体建筑结构隔震技术探析[J].重庆建筑,2017,16(2):45-48.
YU Miao, CEN Ruinan. Isolation Technology of Magnetorheological Elastomers for Building Structures[J].Chongqing Architecture,2017,16(2):45-48.

[4] 时胜杰.近断层脉冲地震动作用下基础隔震结构反应的量化分

析[D].成都:西南交通大学,2017.
SHI Shengjie. Quantitative Analysis of Base Isolated Structure Response under Near Fault Pulse Ground Motion[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2017.

[5] 李明明,方勃,甄亚欣,等.压电-黏弹性材料混合隔振器的设计与研究[J].振动与冲击,2017,36(1):134-140.
LI Mingming, FANG Bo, ZHEN Yaxin, et al. Design and Research of Piezoelectric Viscoelastic Material Hybrid Isolator[J].Journal of Vibration and Shock,2017,36(1):134-140.

[6] 刘冰.桥梁设计中隔震设计的重要性研究[J].江西建材,2018(2):114-114.
LIU Bing. Importance of Seismic Isolation Design in Bridge Design[J].Jiangxi Building Materials,2018(2):114-114.

[7] SEO C, KARAVASILIS T L, RICLES J M, et al. Seismic Performance and Probabilistic Collapse Resistance Assessment of Steel Moment Resisting Frames with Fluid Viscous Dampers[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2015,43(14):2135-2154.

[8] 王晓杰,刘辉,邝文平,等.准零刚度扭转隔振器振动传递特性研究[J].机械工程学报,2018.
WANG Xiaojie, LIU Hui, LI Wenping, et al. Vibration Transmission Characteristics of a Quasi-Zero Stiffness Torsional Isolator[J].Journal of Mechanical Engineering,2018.

[9] 尚庆学,王涛.隔震建筑柔性管线的抗震性能试验研究[J].自然灾害学报,2018(1):50-60.
SHANG Qingxue, WANG Tao. Experimental Study on Seismic Behavior of Flexible Pipelines for Isolated Buildings[J].Journal of Natural Disasters,2018(1):50-60.

[10] MURZEA P. Alternative Kinematic Assumptions for the Motions of Structures with Multiple Dynamic Degrees of Freedom Subjected to Seismic Actions[J].Romanian Journal of Acoustics & Vibration,2014,11(1):53.

[11] OVIDIU V. Experimental Evaluation of the Hysteretic Damping of Elastomeric Systems at Low-cyclic Harmonic Kinematic Displacements[J].Applied Mechanics & Materials,2013,430:323-328.