

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.04.010

基于构件模态应变能比的隔震烟风道 结构等效线性化分析

冯若愚,刘健,柏洁,王辉

(山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061)

摘要:对大型烟风道采用热滑移型双凹摩擦摆(thermal sliding double concave friction pendulum system,TS-DCFP)隔震的结构等效线性化方法进行研究。推导了TS-DCFP采用滑移面等效半径、等效摩擦系数表达的三线性滞回模型的等效刚度和等效阻尼比,适于以非线性变形为主的摩擦摆隔震结构。建立了横向地震作用下的二自由度结构动力分析模型,基于构件模态应变能比,推导了振型组合阻尼比公式。采用提出的等效参数对二自由度烟风道隔震结构进行线性时程分析,并与三维模型非线性时程分析结果进行比较。分析表明,TS-DCFP用于烟风道隔震效果相当显著,且本文提出的等效线性化方法对道体反力、底部剪力的估计接近非线性时程分析结果,用于结构初步设计选型很有效。

关键词:隔震;烟风道;双凹摩擦摆;等效线性化模型;模态应变能比

中图分类号:O39 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)04-0346-07

Equivalent linear analysis of isolated gas duct based on the modal potential energy ratio

FENG Ruoyu, LIU Jian, BAI Jie, WANG Hui

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: An equivalent linear model for the seismic analysis of the isolated gas duct using thermal sliding double concave friction pendulum (TS-DCFP) system is established. The structure is modeled as a two-degree-of-freedom system in the transverse direction. Meanwhile, the effective stiffness and equivalent viscous damping ratio of an isolation bearing with tri-linear behavior are derived and the modal-combined damping ratio is obtained from the modal potential energy ratio of components. The model is verified by comparing the response of a linear time history analysis of the two-degree-of-freedom system with that from the 3D nonlinear time history analysis using the directly integrating method.

Key words: seismic isolation; gas duct; double concave friction pendulum; equivalent linearization model; modal potential energy ratio

火力发电厂随着机组容量的加大,道体截面尺寸也相当大。烟道内部积灰面积可达管道截面面积的1/4。地震作用下,道体会产生很大的惯性力而造成结构破坏。传统烟风道设计为了降低管道热位移的摩擦阻力,通常在支墩(架)和道体间设板式滑动支座。板式滑动支座无隔震耗能能力,缺少自复位能力,且会约

基金项目: 山东大学国家级大学生创新创业训练计划(201610422087);国家自然科学基金(41172267);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAB07B05)

作者简介: 冯若愚(1996—),男,本科生,工程力学专业。E-mail: fengruoyu1996@126.com

通信作者: 刘健(1975—),教授。E-mail: lj75@sdu.edu.cn

引用本文: 冯若愚,刘健,柏洁,等.基于构件模态应变能比的隔震烟风道结构等效线性化分析[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):346-352.

FENG Ruoyu, LIU Jian, BAI Jie, et al. Equivalent linear analysis of isolated gas duct based on the modal potential energy ratio[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(4):346-352.

束道体的转动而可能导致结构破坏。

双凹摩擦摆(double concave friction pendulum, DCFP)隔震支座已经用于日本的建筑^[1]和桥梁结构^[2]。实践证明 DCFP 经济且隔振效果好^[3]。本文提出一种新型烟风道热滑移型双凹摩擦摆隔震支座形式(thermal sliding double concave friction pendulum system, TS-DCFP),如图 1、图 2 所示,支座上、下滑动面均为柱面,柱面半径分别为 R_2 、 R_1 。横向为隔震方向,地震作用下滑块沿柱面环向震动,滑块距上、下挡板距离分别为 d_2 、 d_1 ,滑动面曲率半径和摩擦系数取决于支座在横向地震作用下的总水平位移量要求,保证有效延长整个结构体系的第一自振周期,使隔震性能最佳。烟风道因温差引起的热膨胀位移可沿柱面轴向自由滑动,避免产生导致结构破坏的过高的温度应力。柱面轴向宽度按照设计热位移量确定。

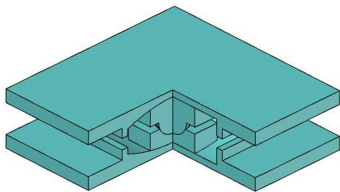


图 1 TS-DCFP 剖面图

Fig.1 Section view of the TS-DCFP

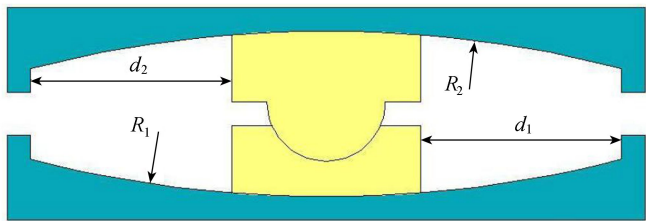


图 2 TS-DCFP 隔震方向尺寸示意图

Fig.2 Cross section of the TS-DCFP with dimensional properties

作者^[4]研究发现,将 TS-DCFP 支座用于烟风道,可同时具有减少摩擦力和隔震功能,不同类别场地地震激励得到的道体反力与支架剪力的减震系数可达 20% ~ 30%,同时保证道体在支座上有较大的转动能力。

隔震支座受力性能为非线性。由于多自由度结构非线性时程分析较为复杂,且初设阶段隔震支座参数未知,隔震设计规范都推荐采用等效线性化分析方法。研究文献多基于橡胶隔震支座的双线性恢复力模型的延性比和初始刚度来定义等效阻尼比^[5-10]。摩擦摆隔震支座的弹性刚度相当大,导致屈服位移接近于零,延性比很大。故用延性比和初始刚度表达的等效阻尼比公式不适用于以非线性变形为主的摩擦摆隔震结构。

等效线性模型整体结构的组合阻尼比应该基于各构件的阻尼比。不同文献及规范对组合阻尼的定义大相径庭^[11]。Turkington 等^[12]、美国 AASHTO 规范将隔震体系的等效阻尼比与桥梁的黏性阻尼比直接相加,过高地估计了隔震桥梁的阻尼。Hwang^[14]采用复模态法求解组合阻尼比,得到的组合阻尼比偏小,对结构动力反应估计过于保守,且在复模态空间求解不便于工程应用。Hwang 等^[14]基于模态应变能密度的方法研究了黏滞阻尼器减震结构的阻尼,但此方法未用于隔震结构。

文献对 DCFP 的研究主要集中在支座受力性能的试验以及力学模型^[15-17],对 DCFP 隔震结构的等效线性化研究为空白。目前,还没有针对烟风道支座隔震方面进行的研究。由于支架为柔性支撑,一般建筑和桥梁的隔震设计方法也不适于烟风道。本文对三线性 TS-DCFP 隔震的烟风道等效线性结构体系进行研究。

1 三线性 TS-DCFP 基于割线刚度的等效线性化

1.1 TS-DCFP 滞回模型

典型的拟静力正弦荷载作用下 TS-DCFP 隔震方向三线性滞回模型如图 3 所示。TS-DCFP 承受的压力为 W_{iso} 。TS-DCFP 的恢复力为

$$F = \frac{W_{iso}}{R_{eff1} + R_{eff2}} u_{iso} + \mu_e W_{iso} \quad (1)$$

式中: u_{iso} ——TS-DCFP 在 2 个摩擦面的水平位移之和; R_{eff1} 、 R_{eff2} ——第 1、第 2 滑移面等效半径^[15]; μ_e ——等效摩擦系数。

TS-DCFP 的等效摩擦系数 μ_e 和位移 u^* 表达式为^[15]

$$\mu_e = \frac{\mu_1 R_{eff1} + \mu_2 R_{eff2}}{R_{eff1} + R_{eff2}} \quad (2)$$

$$u^* = R_{eff1}(\mu_2 - \mu_1) \quad (3)$$

式中: μ_1 、 μ_2 ——第 1 个、第 2 个单摩擦摆滑移面摩擦系数。

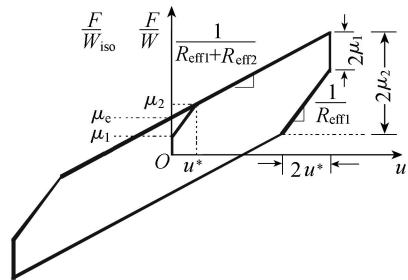


图 3 TS-DCFP 隔震支座三线性滞回模型

Fig.3 Tri-linear behavior of the TS-DCFP isolated bearing

1.2 TS-DCFP 等效刚度和等效阻尼比

以谐振最大位移时的割线刚度为等效刚度^[18]。设与支座设计位移 u_d 对应的恢复力为 F_b ,三线性 TS-DCFP 等效刚度为

$$k_{iso} = \frac{F_b}{u_d} = \left(\frac{1}{R_{eff1} + R_{eff2}} + \frac{\mu_e}{u_d} \right) W_{iso} \tag{4}$$

TS-DCFP 等效阻尼比 ξ_{iso} 根据滞回模型与线性模型在谐振的一个循环内阻尼所耗能量(即滞回环面积 E_{iso})相等确定:

$$\xi_{iso} = \frac{E_{iso}}{2\pi k_{iso} u_d^2} = \frac{2W_{iso} [\mu_e u_d - (\mu_e - \mu_1) u^*]}{\pi k_{iso} u_d^2} \tag{5}$$

2 TS-DCFP 隔震烟风道结构等效线性化

2.1 结构动力分析模型

将隔震支座设于道体和支架之间。在横向水平地震作用下,道体的地震反应有明显的降低,可认为道体为刚体运动,并简化为单质点。又由于剪切型变形的烟风道支架结构第一阶振型为主振型,因此,隔震层下支架结构采用自振周期与其第一阶平动周期相等的单质点来进行等效。将隔震层上部(含道体、隔震层)结构和支架结构分别简化成一个质点,得到二质点计算模型,如图4所示。

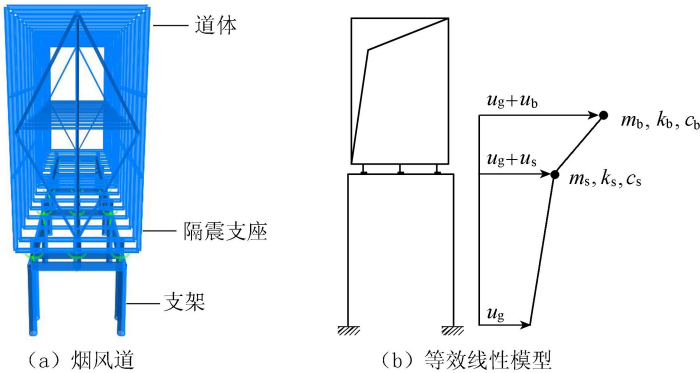


图4 隔震结构二自由度等效线性动力模型

Fig.4 Equivalent linear model of the two-degree-of-freedom isolated system

图4中, k_b 、 c_b 分别代表隔震层的等效刚度和等效阻尼系数, m_b 代表道体的集中质量, k_s 、 m_s 、 c_s 分别为支架的刚度、集中质量和原结构(支架+道体)阻尼系数。选取各质点相对于地面的位移作为运动变量, u_s 为支架质心相对于地面的侧向位移, u_b 为道体质心相对于地面的侧向位移($u_b = u + u_s$)。

k_b 、 c_b 、 c_s 表达式为

$$k_b = \sum_{j=1}^M k_{iso} = \sum_{j=1}^M \left(\frac{1}{R_{eff1} + R_{eff2}} + \frac{\mu_e}{u_d} \right) W_{isoj} \tag{6}$$

$$c_b = 2m_b \omega_b \xi_b = 2\sqrt{m_b k_b} \xi_b \quad c_s = 2(m_b + m_s) \omega_s \xi_s \tag{7}$$

其中

$$\xi_b = \frac{1}{4\pi} \frac{\sum E_{iso}}{U_b} \quad U_b = \frac{k_b u_d^2}{2}$$

式中: M ——隔震层支座个数; ξ_b ——隔震层等效阻尼比; $\sum E_{iso}$ ——全部支座的滞回曲线下的面积和; U_b ——隔震层的应变能; ω_b ——隔震支座的等效自由振动圆频率; ξ_s ——支架阻尼比; ω_s ——支架自由振动圆频率。

该体系在地震作用下的运动方程可表达为

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & -c_b \\ -c_b & c_b + c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b + k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \tag{8}$$

或

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g \tag{9}$$

式中: $\mathbf{M}$ ——质量矩阵; $\mathbf{K}$ ——刚度矩阵; $\mathbf{C}$ ——阻尼矩阵。

该结构的自由振动圆频率 ω_n 及其对应的振型 Φ_n 由公式(8)的动力特征值方程确定,表达式为

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1-\gamma}{2\gamma R_s} \left\{ \left(1 + \frac{R_s}{1-\gamma} \right) \mp \left[\left(1 + \frac{R_s}{1-\gamma} \right)^2 - \frac{4\gamma R_s}{1-\gamma} \right]^{0.5} \right\} \omega_b^2 \tag{10}$$

$$\Phi_n = \begin{Bmatrix} \varphi_{bn} \\ \varphi_{sn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 - \alpha_n \end{Bmatrix} \tag{11}$$

其中 $\omega_b^2 = \frac{k_b}{m_b}$ $\omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s + m_b}$ $R_s = \frac{k_b}{k_s}$ $\gamma = \frac{m_s}{m_s + m_b}$ $\alpha_n = \frac{\omega_n^2}{\omega_b^2} n = 1, 2$

2.2 基于构件模态应变能比的组合阻尼比

基于构件的模态应变能比计算二自由度隔震结构各振型的组合阻尼比。结构体系耗散的总能量为

$$E_t = 4\pi\xi_b U_b + 4\pi\xi_s U_s = 4\pi\xi_c U_t \tag{12}$$

式中: ξ_c ——结构体系的组合阻尼比; U_s ——支架的应变能; U_t ——体系的应变能。

由式(12)得

$$\xi_c = \xi_b \frac{U_b}{U_t} + \xi_s \frac{U_s}{U_t} \tag{13}$$

式(13)表明,结构体系的组合阻尼比取决于隔震层和支架的应变能与总应变能的比值。

将位移向量 $\mathbf{u}$ 按振型贡献展开,得

$$\frac{U_{sn}}{U_{tn}} = \left| \frac{\Phi_n^T \mathbf{K}_s \Phi_n}{\Phi_n^T \mathbf{K} \Phi_n} \right| \quad \frac{U_{bn}}{U_{tn}} = \left| \frac{\Phi_n^T \mathbf{K}_b \Phi_n}{\Phi_n^T \mathbf{K} \Phi_n} \right| \tag{14}$$

将式(14)代入式(13),得第 n 振型的组合阻尼比:

$$\xi_{cn} = \xi_s \frac{\mu R_s \alpha_n^2 + (1 - \alpha_n)^2}{R_s \alpha_n^2 + (1 - \alpha_n)^2} \tag{15}$$

其中 $\mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}$ $\mathbf{K}_b = \begin{bmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b \end{bmatrix}$ $\mu = \frac{\xi_b}{\xi_s}$

3 模型验证与工程应用

采用 ABAQUS 有限元软件对某火电厂矩形烟风道进行分析。取 2 个金属补偿器之间的结构为研究对象,分别建立 2 个模型:(a)三维实体模型,进行隔震与非隔震体系的直接积分非线性时程(DNLTH)分析;(b)二自由度模型,进行隔震体系的直接积分线性时程分析(DLTH)和线性模态时程分析(MLTH)。

DNLTH 前处理模型如图 5(a) 所示。上部为道体,下部为支架,TS-DCFP 支座安装在道体与支架的连接处(共 15 个)。道体尺寸长×宽×高为 11.86 m×3.2 m×6 m,壁厚 6 mm。下部支架为 5 列,每列 2 个支柱。支柱采用 $\varnothing 219 \times 6$ mm 无缝钢管,高为 3 m。支架抗侧刚度 $k_s = 26\,979$ N/mm,惯性质量 $m_s = 3.03$ N·s²/mm。道体横向加固肋采用 10 号槽钢,平均肋间距为 750 mm,纵向采用角钢加固,烟风道内设有圆管内撑。TS-DCFP 共 15 个。TS-DCFP 上滑面等效半径为 470 mm,滑动摩擦系数为 0.01;下滑移面等效半径为 460 mm,滑动摩擦系数为 0.1。

惯性质量考虑自重、0.5 倍积灰荷载和保温荷载,其中保温荷载为 0.24 kPa、积灰荷载为 14.7 kPa。道体惯性质量 $m_b = 68.23$ N·s²/mm。

DNLTH 模型的道体采用壳单元模拟,支架、加固肋、内撑采用梁单元模拟。由于隔震层的引入,材料仅采用弹性本构。支架阻尼比为 0.03。

DNLTH 模型需要模拟 TS-DCFP 摆的作用和摩擦作用。ABAQUS 软件中没有专门模拟摩擦摆隔震支座的单元。为了简化分析,单摩擦摆(FPS)隔震支座用 Gap 单元和 Spring 连接单元模拟。Gap 单元模拟 FPS 的竖向承载力以及摩擦性能, Spring 单元模拟摆的作用。TS-DCFP 在隔震方向的模拟用 2 个 FPS 串联实现;热滑移方向去掉 Spring 弹簧单元,保留 Gap 单元即可模拟其摩擦滑移性能。

地震激励分别取 Loma Prieta 波、EL Centro 波、Imperial Valley 波、Hollister 波、Kobe 波。将地震波在时域

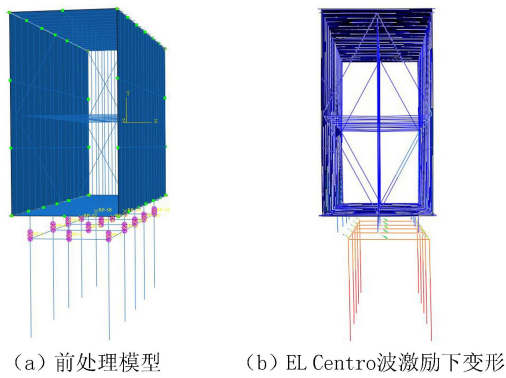


图5 烟风道隔震体系三维实体有限元 DNLTH 分析模型
Fig.5 3D FE model of isolated duct for the DNLTH analysis

范围内进行调整,使其反应谱和目标谱吻合。目标谱为建筑抗震规范给出的 II 类坚硬场地上的 8 度罕遇地震设计反应谱,场地特征周期 T_g 为 0.35g,阻尼比为 0.03。

EL Centro 波激励下,三维隔震结构 DNLTH 分析得到变形如图 5(b) 所示,道体近似为刚体运动,证明了二自由度模型将道体简化为质点的正确性。DNLTH 分析得到的非隔震结构和隔震结构道体反力、支架底部剪力对比如图 6 所示。隔震结构和非隔震结构道体反力峰值分别为 124 kN、698 kN,底部剪力分别为 135 kN、729 kN。道体反力和支架底部剪力水平向减震系数分别为 17.8%、18.5%,TS-DCFP 隔震效果相当显著。

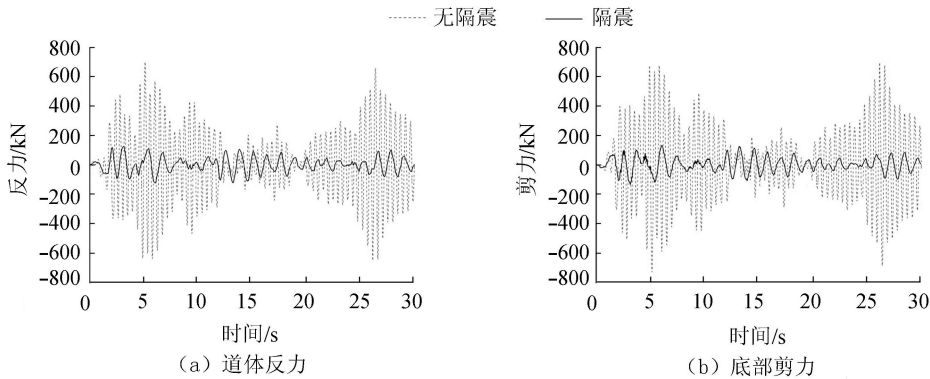


图6 EL Centro 波激励下三维模型隔震、非隔震结构 DNLTH 分析道体反力、底部剪力
Fig.6 Reaction forces and shear forces from the 3D DNLTH analysis of non isolated duct and isolated duct under EL Centro earthquake

对二自由度隔震烟风道结构模型,隔震层采用等效刚度 k_b ,用弹簧单元模拟。DLTH 分析模型分别定义隔震层等效阻尼系数和支架阻尼系数,阻尼矩阵为非比例阻尼;MLTH 分析模型采用振型组合阻尼比,支架和隔震层不单独定义阻尼,阻尼矩阵为经典阻尼。

MLTH 分析步骤如下:(a) 估计隔震层的最大位移 u_d 。本文根据 DNLTH 分析获得,为 79.36 mm。(b) 计算各支座承受的压力 W_{iso} 。(c) 按式(4) 计算每个支座的等效刚度。(d) 按式(6) 计算隔震层的等效刚度 $k_b=1614\text{ N/mm}$ 。(e) 确定隔震层的等效阻尼比,为 0.14。(f) 按式(15) 确定隔震体系的振型组合阻尼比 $\xi_{cl}=0.134, \xi_c=0.036$ 。(g) 地震作用下的线性模态时程分析,整体阻尼采用振型组合阻尼比。

EL Centro 波激励下,隔震结构道体反力、底部剪力 DNLTH、MLTH 分析结果对比如图 7 所示。DNLTH 和 MLTH 分析得到的道体反力峰值分别为 124 kN、116 kN,底部剪力峰值分别为 135 kN、132 kN。DNLTH 和 MLTH 分析结果很接近。

设二自由度模型 DLTH 分析、MLTH 分析得到的道体最大反力、底部最大剪力与三维 DNLTH 分析相应结果的比值分别为 R_A, R_V 。图 8~9 为 5 条地震波激励下得到的 R_A, R_V 和调整后的各地震波峰值加速度 A_p 及其与峰值速度 V_p 的比值 A_p/V_p 关系。 R_A 小于 1,变化范围为 0.920~0.963, R_V 变化范围为 0.911~1.075。2 种线性分析对 A_p/V_p 最小的(Loma Prieta 波)地震反应估计最优。

2 类线性时程分析对道体的位移和反力、底部剪力的估计略低,说明采用等效能耗法得到的隔震层等效

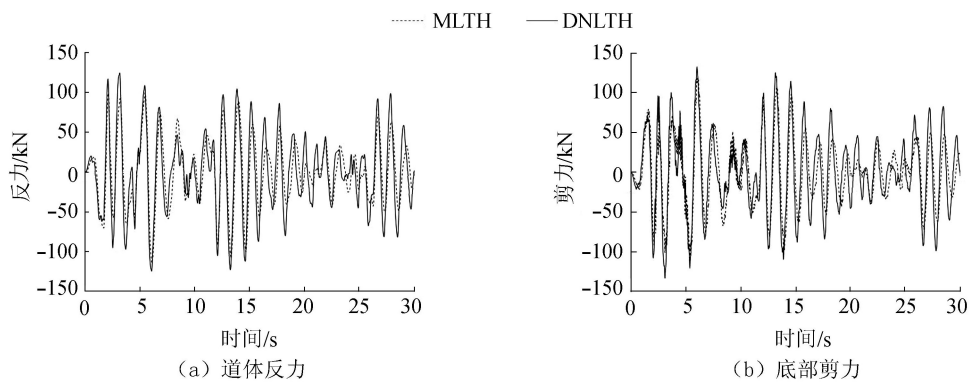


图 7 EL Centro 波激励下隔震结构三维实体 DNLTH、MLTH 分析道体反力、底部剪力时程

Fig.7 Reaction forces and shear forces from 3D DNLTH and 3D MLTH analysis of isolated duct under EL Centro earthquake

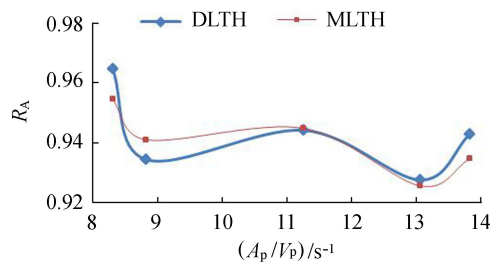


图 8 道体最大反力比值

Fig.8 Maximum reaction force ratio of duct

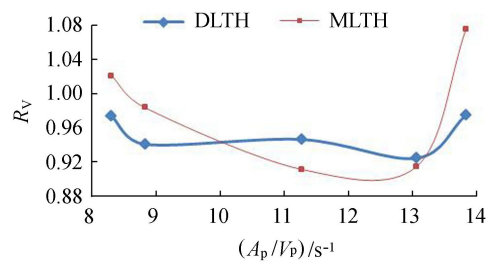


图 9 底部最大剪力比值

Fig.9 Maximum base shear ratio of duct

阻尼较大,这种差异并不随着 A_p/V_p 的增加而提高。由于计算等效阻尼比时隔震支座采用设计位移,而由于柔性支架上部未采用刚性隔板假定,实际并非所有支座均达到最大位移,因此过高估计了结构阻尼,因此等效线性化对道体反力和底部剪力估计略低,但作为初步设计结构选型,本法依然很有效。

4 结 语

TS-DCFP 用于烟风道隔震,效果显著。笔者对大型烟风道采用 TS-DCFP 隔震的结构等效线性化方法进行研究,推导了三线性滞回模型 TS-DCFP 的等效刚度和等效阻尼比。与以延性比和初始刚度表达的等效阻尼比公式不同,该公式采用滑移面等效半径、等效摩擦系数表达,更适于以非线性变形为主的摩擦摆隔震结构。根据构件的模态应变能比,推导了二自由度隔震结构的振型组合阻尼公式,表达式简洁易求解,便于隔震结构初步设计。

采用二自由度模型,利用所推导的 TS-DCFP 等效刚度和等效阻尼比进行 DLTH 分析;利用所推导的振型组合阻尼比进行 MLTH 分析。2 类线性时程分析对道体反力、底部剪力的估计接近三维模型 DNLTH 分析结果。

参考文献:

[1] WARN G P. A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs [J]. Buildings, 2012, 2: 300-325.

[2] BUCKLE I G, CONSTANTINOU M C, DICLELI M, et al. Seismic isolation of highway bridges, special report MCEER-06-SP07 [R]. New York: University at Buffalo, 2006.

[3] FENZE D M, CONSTANTINOU M C. Behaviour of the double concave friction pendulum bearing [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35: 1403-1424.

[4] 冯若愚,陈瑛,王辉,等. 三线性双凹摩擦摆隔震烟风道结构动力反应分析 [J]. 力学与实践, 2017, 39 (5): 472-478. (FENG Ruoyu, CHEN Ying, WANG Hui, et al. Seismic response of isolated gas duct using DCFP bearing with tri-linear behaviors [J]. Mechanics in Engineering, 2017, 39 (5): 472-478. (in Chinese))

[5] HWANG J S. Evaluation of equivalent linear analysis methods of bridge isolation [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,

1996,122(8):872-976.

[6] ÖZDEMİR G. Formulations of equivalent linearization of lead-rubber bearings for incorporating the effect of lead core heating [J]. Earthquake Spectra, 2015,31(1):317-337.

[7] MAVRONICOLA E, KOMODROMOS P. Assessing the suitability of equivalent linear elastic analysis of seismically isolated multi-storey buildings[J]. Computers & Structures, 2011, 89(21/22):1920-1931.

[8] 韩军,杜彦兵,李英民,等. 等效线性化方法在 RC 框架结构设计中的应用[J]. 建筑结构学报,2016,37(5):185-192. (HAN Jun,DU Yanbing, LI Yingmin, et al. Application of equivalent linearization method in design of RC frame structure[J]. Journal of Building Structures,2016,37(5):185-192. (in Chinese))

[9] IWAN W D. Estimating earthquake response of simple hysteretic structures[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1979,105(3):391-405.

[10] HWANG J S. An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings[J]. Engineering Structures, 1996,18(7):528-536.

[11] AKKAR S D, MIRANDA E. Statistical evaluation of approximate methods for estimating maximum deformation demands on existing structures[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,2005,31(1):160-172.

[12] TURKINGTON D H, CARR A J, COOKE N, et al. Seismic design of bridges on lead-rubber bearings[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,1989, 115(12):3000-3016.

[13] HWANG J S. Composite damping ratio of seismically isolated regular bridges[J]. Engineering Structures, 1997, 19(1):55-62.

[14] HWANG J S, YI S L, HO S Y. Equivalent damping ratios of structures with supplemental viscous dampers[J]. Engineering Structures, 2004, 26: 1735-1749.

[15] FENZE D M, CONSTANTINOU M C. Mechanical behavior of multispherical sliding bearings[R]. New York: University of Buffalo, 2008.

[16] TSAI C S, CHIANG T C, CHEN B J. Experimental evaluation of piecewise exact solution for predicting seismic responses of spherical sliding type isolated structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2005,10:27-46.

[17] 邓雪松,龚健,周云. 双凹摩擦摆隔震支座理论分析与数值模拟研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2010,9(4):71-77. (DENG Xuesong, GONG Jian, ZHOU Yun. Study on theoretical analysis and numerical simulation of double concave friction pendulum bearing[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition) 2010, 9(4):71-77. (in Chinese))

[18] ROSENBLUETH E, HERRERA I. On a kind of hysteretic damping[J]. Journal of Engineering Mechanics Division ASCE, 1964, 90(4):37-48.

(收稿日期:2017 -05 -15 编辑:高建群)

• 简讯 •

海岸动力与环境国际研讨会在河海大学召开

为了促进港口、海岸及近海工程一流学科的建设,加强河海大学与奥克兰大学、南洋理工大学间的学术交流与国际合作,海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学)于2018年6月11—16日召开了海岸动力与环境国际研讨会。会议共邀请报告14个,涉及河口海岸水动力过程、泥沙输运、水环境治理、海岸城市用水安全等多个研究领域,与会学者就港口、海岸及近海工程学科领域内热点问题进行交流 and 讨论,分享最新研究进展,并讨论国际项目联合申报、师生交流互换等方面的合作。

(本刊编辑部供稿)