

高举架立式圆筒型储液容器基础隔震数值分析

崔利富¹,吕 远²,孙建刚¹,王 振¹

(1. 大连民族大学土木工程学院, 辽宁 大连 116650;

2. 大连海事大学交通运输装备与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要 通过对高举架立式圆筒型储液容器基础隔震数值分析,探究高举架储罐基础隔震的可行性。**方法** 依据 ACI 简化力学模型提出分散支承质量简化力学模型的方法,并通过在其底部植入隔震层,建立基础隔震简化力学模型并推导其运动控制方程,采用数值方法对比分析了不同条件下地震动响应。**结果** ACI 简化法与分散支承质量简化法计算结果相近,说明笔者提出的分散支承质量简化力学模型是可行的;基础隔震能有效控制高举架立式圆筒型储液容器地震动响应;隔震周期和隔震层阻尼尼比越大,基础隔震减震效率越高。**结论** 建议基础隔震设计时需根据工程实际情况选择最佳隔震层参数。

关键词 高举架;立式圆筒型储罐;力学模型;基础隔震

中图分类号 TU352

文献标志码 A

The Numerical Analysis of Base Isolation for Elevated Vertical Cylinder Storage Tanks

CUI Lifu¹, Lü Yuan², SUN Jiangang¹, WANG Zhen¹

(1. College of Civil Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian, China, 116650; 2. Transportation Equipment and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026)

Abstract: Through the numerical analysis of the base isolation elevated vertical cylinder storage tanks, the feasibility of base isolation is explored. According to the simplified mechanical model of ACI, the method of simplifying the mechanical model of dispersed bearing mass is proposed. By installing the isolation layer at the bottom the simplified mechanical model of the base isolation is established and the motion control equation is derived. The numerical method is used to compare and analyze the ground motion under different conditions. The calculation results of ACI simplification method and dispersed bearing mass simplification method are similar, which shows that the simplified mechanical model of dispersed support is feasible. The base isolation can effectively control the ground motion response of the vertical cylindrical storage tank. The longer isolation period and the larger damping ratio, the higher the efficiency of base isolation. It is suggested that the optimum isolation layer parameters should be selected according to the actual engineering condi-

收稿日期:2017-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51478090,51878124);辽宁省自然科学基金项目(20180550073)

作者简介:崔利富(1982—),男,博士,主要从事防灾减灾工程及防护工程方面研究。

tions.

Key words: elevated; vertical cylinder storage tanks; mechanical model; base isolation

高举架立式圆筒型储液容器是石油化工企业及生活生产中非常重要的基础设施,研究其在地震作用下的动力反应及其减震措施具有重要意义.目前国内外学者对立式储罐基础隔震的研究已较为深入.孙建刚及其团队针对大型立式储罐基础隔震技术展开了理论、仿真、试验及应用的一系列研究,研究成果表明:基础隔震能大幅降低立式储罐罐体及储液的动态荷载,但对储液晃动为发现明显的限制作用^[1-9].而对于高举架储罐来说虽然其结构形式及动特性与立式储罐不同,但同样可采用类似的隔、减震方式.文献[10-12]针对高举架储罐的结构特点研究了不同的隔震方式(基础隔震、柱顶隔震)在其上的应用,得出两种隔震方式均能很好地降低储罐及结构的地震荷载.王振教授^[13-14]研究了不同条件下(频率、罐容、场地)基础隔震对高举架储罐地震响应的减震效率,系统地论证了基础隔震在此类结构中应用的可行.肖志刚等^[15-17]将黏弹性阻尼器、摩擦阻尼器等耗能装置应用于支架式球形储罐中,得出在球罐拉杆等支撑结构装置耗能元件时行之有效的减震方式.吕远等^[18-19]采用数值仿真及理论推导等手段研究了高举架储罐基础隔震及附加黏滞阻尼器等隔、减震措施的减震效果,为隔、减震设计提供了依据.

在以往高举架储罐抗、减震研究中,多采用美国混凝土结构设计规范(ACI)中的支承结构集中质量法,以此建立高举架储罐支承结构部分的力学模型,总体来讲力学模型偏于简单,无法获得关于支承结构部分的受力特点.因此,笔者将支承结构每一层简化为一个集中质量点,建立了新的简化力学模型,对比分析了两种简化力学模型地震动响应.引入基础隔震思想,并进行了参数影响分析,为高举架立式圆筒型储液容器基础隔震设计及

方案选择提供依据.

1 简化力学模型及运动控制方程

1.1 ACI 简化法

美国混凝土结构设计规范(ACI)中介绍可将高举架立式圆筒型储液容器支承结构总质量的2/3集中于支承顶部,建立简化力学模型.而为了考虑上部储罐储液晃动对此类结构地震动响应的影响,储罐的力学模型可采用立式储罐刚性理论,将储液简化为两质点模型(晃动质量 m_c ,刚性质量 m_r),简化力学模型如图1所示.

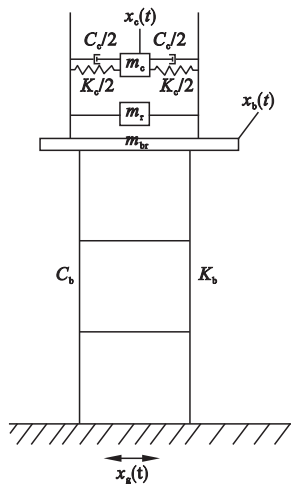


图1 ACI模型

Fig. 1 ACI model

基于孙建刚^[3]立式储罐两质点水平隔震力学模型参数,可知 m_c 、 m_r 及晃动频率 $\omega_c = \frac{1.84}{R} \tanh(1.84 S)$,且 $S = H_l/R$;晃动分量刚度参数及阻尼参数分别表示为 $k_c = m_c \omega_c^2$, $c_c = 2\xi_c \omega_c m_c$,其中 $\xi_c = 0.005$ 为晃动分量阻尼比.图中 k_b 、 c_b 分别为支承结构侧向刚度和阻尼系数,结构阻尼系数可由Rayleigh阻尼模型得出 $c_d = \alpha m + \beta k$. $x_c(t)$ 、 $x_r(t)$ 、 $x_d(t)$ 分别对应晃相对动位移、刚性质

量相对位移、地面运动。

基于文献[3],可得到等效高度 h_c, h_r 。由此根据结构动力学中 Hamilton 原理 $\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = 0$,可得运动控制方程:

$$\begin{bmatrix} m_c & m_c \\ m_c & m_c + m_r + m_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_c(t) \\ \ddot{x}_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_c \\ c_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c(t) \\ \dot{x}_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c \\ k_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_c \\ m_c + m_r + m_b \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t). \quad (1)$$

可得出晃动波高、基底剪力、基地弯矩的运动控制方程:

$$\begin{aligned} h_v &= 0.837R \frac{\ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_b(t) + \ddot{x}_g(t)}{g}. \quad (2) \\ Q &= -m_c [\ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_b(t) + \ddot{x}_g(t)] - (m_r + m_{br}) [\ddot{x}_b(t) + \ddot{x}_g(t)]. \quad (3) \\ M &= -m_c [\ddot{x}_c(t) + \ddot{x}_b(t) + \ddot{x}_g(t)] \cdot (h_c + h) - (m_r + m_{br}) [\ddot{x}_b(t) + \ddot{x}_g(t)] \cdot (h_r + h). \quad (4) \end{aligned}$$

式中: h 为平台板距地面高度。

1.2 分散支承质量简化法

高举架储罐的支承结构通常为多层钢筋混凝土框架结构,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010),可采用分层建模的方法将框架结构离散为多个集中质量。由此将框架结构力学模型与储罐力学模型组合可得高举架储罐的力学模型,如图 2 所示。

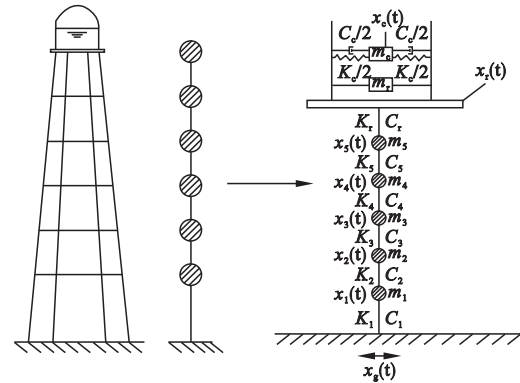


图 2 分散支承质量简化力学模型

Fig. 2 Simplified mechanical model of dispersed support mass

同样依据 Hamilton 原理可推知其运动控制方程:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = M_{eq}\ddot{x}_g(t). \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} m_1 & & & 0 \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_c \end{bmatrix}, \\ K &= \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 & & 0 \\ & k_2 & -k_3 & \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & k_r & -k_c \\ 0 & & & & k_c \end{bmatrix}, \\ M_{eq} &= \begin{bmatrix} m_1 & & & 0 \\ & m_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & m_c \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

u 为相对位移向量;阻尼矩阵同样由 Rayleigh 阻尼模型得出 $C = \alpha M + \beta K$ 。

基地剪力、基地弯矩、晃动波高方程式:

$$\begin{aligned} Q &= m_c (\ddot{u}_c + \ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) + m_r (\ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) + m_5 (\ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) + \cdots + m_1 (\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g). \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= m_c (\ddot{u}_c + \ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) \times (h_c + 32.7) + m_r (\ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) \times (h_r + 32.7) + m_5 (\ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) \times 27.5 + \cdots + m_1 (\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) \times 7.5. \quad (7) \end{aligned}$$

$$h = 0.837R \frac{\ddot{u}_c + \ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_1 + \ddot{x}_g}{g}. \quad (8)$$

1.3 基础隔震力学模型及运动控制方程

根据 1.2 节中的建模方法,针对高举架储罐引入基础隔震思想,构建高举架储罐基础隔震力学模型,如图 3 所示。

基础隔震装置可等效为线性刚度系数 k_0 及阻尼系数 c_0 :

$$k_0 = m \left(\frac{2\pi}{T_b} \right)^2. \quad (9)$$

$$c_0 = \zeta m \frac{4\pi}{T_b}.$$

式中: T_b 为隔震周期; ζ 为隔震阻尼比.

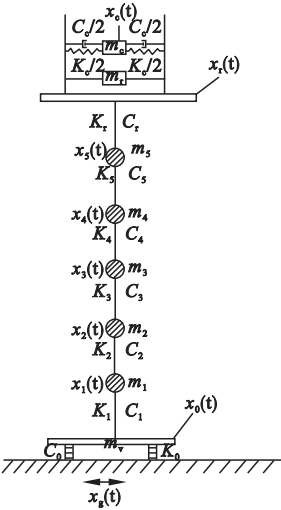


图3 基础隔震简化力学模型

Fig.3 Simplified mechanical model of base isolation

对基础隔震简化力学模型来说:

$$M = \begin{bmatrix} m_0 & & & & 0 \\ & m_1 & & & \\ & m_2 & m_2 & m_2 & \\ & \vdots & & \ddots & \\ & m_c & \cdots & & m_c \end{bmatrix},$$
$$K = \begin{bmatrix} k_0 & -k_1 & & & \\ & k_1 & -k_2 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & k_r & -k_c \\ & & & & k_c \end{bmatrix},$$
$$M_{eq} = \begin{bmatrix} m_0 & & & 0 \\ & m_1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & m_c \end{bmatrix}.$$

基底剪力、基地弯矩、晃动波高运动方程式分别为

$$Q = m_c (\ddot{u}_c + \ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_0 + \ddot{x}_g) +$$
$$m_r (\ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_0 + \ddot{x}_g) + m_5 (\ddot{u}_5 + \cdots +$$
$$\ddot{u}_0 + \ddot{x}_g) + \cdots + m_0 (\ddot{u}_0 + \ddot{x}_g).$$
$$M = m_c (\ddot{u}_c + \ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_0 + \ddot{x}_g) (h_c + 32.7) +$$

11

$$m_r (\ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_0 + \ddot{x}_g) (h_r + 32.7) +$$
$$m_5 (\ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_0 + \ddot{x}_g) \times 27.5 + \cdots +$$
$$m_1 (\ddot{u}_1 + \ddot{x}_g) \times 7.5$$
$$h = 0.837R \frac{\ddot{u}_c + \ddot{u}_r + \ddot{u}_5 + \cdots + \ddot{u}_0 + \ddot{x}_g}{g}.$$

12

13

2 算例分析

选取以储液量为 50 m³ 的高举架储罐进行算例分析^[20-22]. 实际工程情况:6 根支柱呈正六边形分布,支架总高 $H = 32.5$ m,分六层.

表1 算例参数

Table 1 The parameters in the example

支承结构	圈梁间距/m	截面尺寸/m
第一、二层圈梁	7.50	0.450 × 0.450
其余圈梁	5.00	0.400 × 0.400
圈梁	—	0.250 × 0.400
圈梁	—	0.250 × 0.400

框架结构顶部圈梁直径为 4.8 m,支柱具有一定倾斜角度,为 1/20,底部圈梁直径为 8.05 m. 放置储罐的平台板厚 0.2 m. 支承体系的梁、柱、板均为钢筋混凝土结构,等效杨氏模量 $E = 2.6 \times 10^{10}$ Pa,密度 $\rho = 2\,400$ kg/m³. 圆筒型储罐直径与顶层圈梁相同,钢制筒型罐壁罐壁高 3.0 m,储罐底板和罐壁厚均为 10 mm. 储罐为拱顶罐,拱顶钢板厚 6 mm. 钢材弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11}$ Pa,屈服强度 $\sigma_y = 490$ Pa,剪切模 $G = 39.73$ Pa. 罐内液体密度 $\rho = 1.0 \times 10^3$ kg/m³,液面高度可设为 2.2 m.

2.1 地震动输入的选取

选取金门公园波、北京饭店波、El-Centro 波及 Pasadena 波作为地震动输入,PGA = 0.2 g.

2.2 抗震模型地震动响应对比分析

选取上述 4 类地震波为地震动荷载,加速度时程峰值均为 0.2 g. 以储液晃动高度、支柱底部剪力及基底弯矩为控制目标对比分

析 ACI 法和分散质量法两种简化方式. 计算结果如图 4 及表 2 所示.

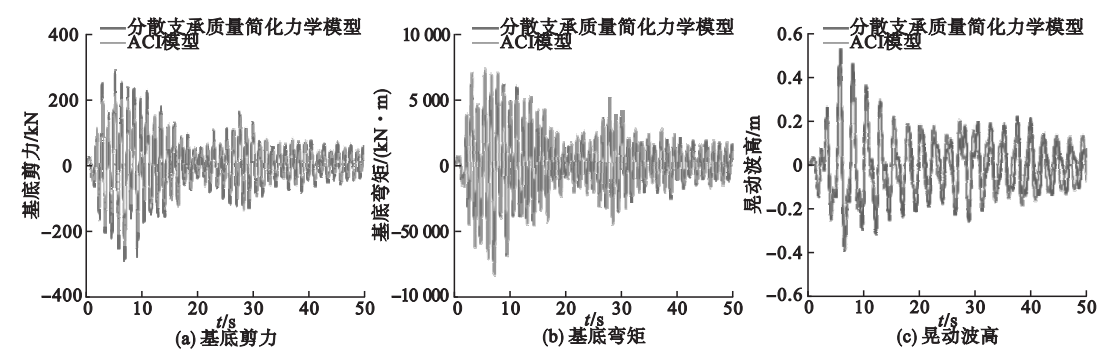


图 4 El Centro 地震动响应时程曲线

Fig. 4 Time history curve of El Centro ground motion response

表 2 金门公园地震动响应峰值

Table 2 Peak ground motion response of Jinmen park

地震输入	简化方式	支柱底部剪力 峰值/ 10^5 N	支柱底部弯矩 峰值/ 10^5 (N·m)	储液晃动 高度/mm
金门公园波	分散支承质量简化力学模型	0.825	11.46	100.7
	ACI 模型	0.507	17.01	60.4
北京饭店波	分散支承质量简化力学模型	7.427	204.77	1 861.9
	ACI 模型	6.550	220.35	1 712.0
El Centro 波	分散支承质量简化力学模型	2.903	78.44	521.0
	ACI 模型	2.462	82.75	455.2
Pasadena 波	分散支承质量简化力学模型	4.527	123.39	740.6
	ACI 模型	3.944	132.51	655.3

根据表 2 中数据,在上述四条地震波作用下采用分散支承质量法计算所得的支柱底部剪力峰值及储液晃动高度均大于 ACI 法,而支柱底部弯矩峰值的计算结果却正好相反. 根据弯矩计算公式 $M=Q\cdot H$,表示水平剪力与等效高度的乘积,由此 ACI 法来说虽然总的底部剪力值偏小,但等效高度 H 偏大(质量集中于支承结构顶部),所以使得底部弯矩的计算结果较分散支承质量法偏大. 但从差异率上看,两种方式计算结果差异率较小,所以认为笔者提出的采用分散支承质量法构建简化力学模型是可行的.

2.3 高举架立式圆筒型储液容器基础隔震数值分析

选取 El Centro 波作为地震动输入, $PGA=0.2\text{ g}$. 其中隔震层参数 $T_b=2\text{ s}$, $\xi=$

0.1. 研究高举架储罐基础隔震的减震效率, 计算结果如图 5 所示.

根据图 5 可知,高举架储罐引入基础隔震后能有效降低支承结构部分(支柱底部剪力、弯矩,层间位移角,层间剪力)及上部储罐部分(储液晃动高度,储罐底部剪力)的地震受力. 其中上部储罐减震率约为 45%; 支承结构部分减震率约为 48%~56%,且支承结构层间位移角最大值均大于拟定目标 1/300 之下,此时结构仍处于弹性阶段,说明基础隔震措施有效地减小了地震动能量由地面向上部结构的传导率,从而也降低了上部储罐的地震受力. 从图 5(d)上可以看出,基础隔震对储液晃动效应的控制有限. 这是由于储液晃动周期较长,植入隔震层后结构整体自振周期虽然延长,但并未远离储液晃动

周期,无法起到减震控制效果,有时甚至会有放大效应.

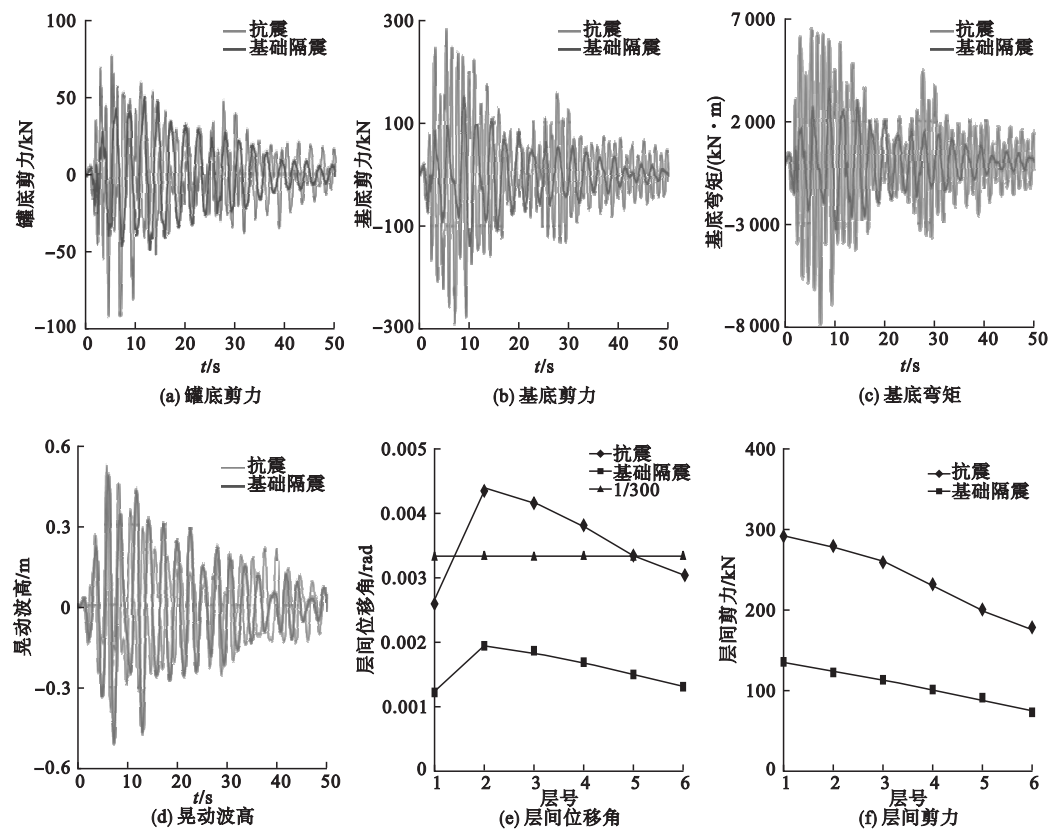


图 5 地震动响应

Fig. 5 Ground motion response

地震动响应频谱特性如图 6 所示. 从图 6(a)中频谱图中可看出, El Centro 波的卓越频率大概为 2.16 Hz, 而非隔震与隔震时柱底剪力时程曲线的卓越频率分别为 0.85 Hz 及 0.37 Hz, 根据《结构动力学》中关于隔震体系减震效果的表述, 当荷载频率与隔震体

系自振频率的比值大于 1.414 时, 会产生减震效果, 且比值越大减震效果越好. 基础隔震与柱顶隔震时基底剪力卓越频率与地震动卓越频率比值远大于 1.414, 所以能起到降低地震受力的效果.

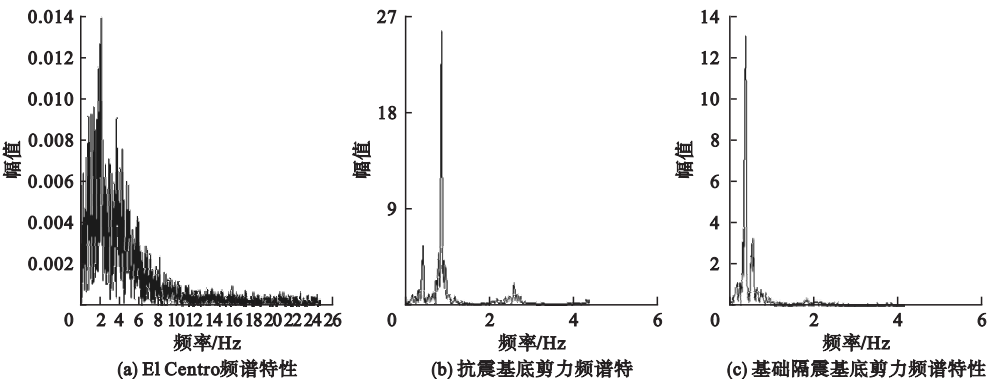


图 6 地震动响应频谱特性

Fig. 6 Spectral characteristics of ground motion response

2.3.1 不同地震动输入时地震动响应对比分析

选取 $PGA = 0.2\text{ g}$, 将金门公园波、北京饭店波、El - Centro 波及 Pasadena 波 4 类地

震波作为地震动荷载,进行响应研究,其中隔震层参数 $T_b = 2\text{ s}$, $\xi = 0.1$. 不同地震动输入各 2 况峰值及减震率如表 3 所示.

表 3 不同地震动输入各工况峰值及减震率

Table 3 The vibration reduction rate and each condition peak for different ground motion input						
地震波	工况	储罐底部剪力	支柱底部剪力	支柱底部弯矩	储液晃动高	层间位移角
		峰值/ 10^5 N	峰值/ 10^5 N	峰值/ $10^5\text{ (N}\cdot\text{m)}$	度/mm	/rad
金门公园波	非隔震	0.313	0.825	11.464	100.7	1/1 104
	基础隔震	0.156	0.453	11.667	163.3	1/1 610
北京饭店波	非隔震	2.537	7.427	204.770	1 861.9	1/90
	基础隔震	2.759	7.067	178.470	2 287.5	1/107
El Centro 波	非隔震	0.912	2.903	78.442	521.0	1/228
	基础隔震	0.499	1.490	36.022	503.7	1/516
Pasadena 波	非隔震	1.260	4.527	123.390	740.6	1/149
	基础隔震	0.879	2.436	58.795	1 070.5	1/313

从表 3 中可以看出,对不同地震动输入减震效果差异性较大. 金门公园波输入时,采用基础隔震后支柱底部剪力减小,但底部弯矩峰值变化不大. 由于金门公园波自身卓越频率比结构自振频率大得多,根据 2.2 节中所述其结构地震动响应也较小. 北京饭店波输入时,基础隔震措施对其结构的地震响应控制有限,储罐底部剪力及储液晃动效应甚至被放大了. 由此可以看出结构自身动特性

及地震动频谱特性对基础隔震的减震效率有较大影响,建议基础隔震设计时需充分考虑此类因的影响.

2.3.2 不同隔震周期时地震动响应对比分析

选取 El Centro 波作为地震动输入, $PGA = 0.2\text{ g}$, 研究基础隔震隔震周期不同时 ($T_b = 2\text{ s}$, 3 s , 4 s , 5 s , $\xi = 0.1$) 的减震效率. 计算结果如表 4 所示.

表 4 隔震周期不同情况下各工况峰值及减震率

Table 4 The vibration reduction rate and each condition peak for different isolation periods					
T_b/s	储罐底部剪力 峰值/ 10^5 N	支柱底部剪力 峰值/ 10^5 N	支柱底部弯矩 峰值/ $10^5\text{ (N}\cdot\text{m)}$	储液晃动 高度/mm	层间位移 角/rad
0	0.912	2.903	78.442	521.0	1/228
2	0.499	1.490	36.022	503.7	1/516
3	0.365	0.666	17.739	262.2	1/1 104
4	0.297	0.363	11.334	138.1	1/1 619
5	0.166	0.280	7.458	85.0	1/2 534

注: $T_b = 0\text{ s}$ 为无隔震工况.

从表 4 中数据可以看出,随着隔震周期的延长,减震效率越来越好. 这是由于基础隔震措施能够增强结构柔性,使结构体系自振

频率远离地震动卓越频率,达到减震目的. 且当隔震周期越大时,隔震层与高举架立式圆筒型储液容器串联二产生的串联刚度越小,

结构体系自振周期越长,从而越远离地震动卓越周期,因此隔震周期越长减震效果越好.

2.3.3 不同隔震阻尼比时地震动响应对比分析

表5 隔震阻尼比不同情况下各工况峰值及减震率

Table 5 The vibration reduction rate and each condition peak for different damping ratios

ξ	储罐底部剪力	支柱底部剪力	支柱底部弯矩	储液晃动	层间位移
	峰值/ 10^5 N	峰值/ 10^5 N	峰值/ 10^5 (N·m)	高度/mm	角/rad
0	0.912	2.903	78.442	521.0	1/228
0.1	0.499	1.490	36.022	503.7	1/516
0.2	0.508	1.390	33.813	477.1	1/553
0.3	0.489	1.237	29.958	435.0	1/634
0.4	0.514	1.125	26.790	413.4	1/720

注: $\xi=0$ 为无隔震工况.

从表5中的数据可以看出,对不同隔震层阻尼比,基础隔震均有较好减震效果.随着隔震层阻尼比增加,除罐底剪力外各工况值逐渐减小,减震率增加.这是由于随着隔震层阻尼比增加,结构体系阻尼增大,地震动作用时消耗更多能量,从而使结构地震动响应减小.

3 结 论

ACI 简化法与分散支承质量简化法计算结果相近,说明笔者提出的分散支承质量简化力学模型是可行的;基础隔震能有效控制高举架立式圆筒型储液容器地震动响应,随着隔震周期及隔震层阻尼比增加,减震率越大;基础隔震减震率与地震动频谱特性密切相关,建议隔震设计时需根据工程实际综合考虑场地条件及隔震层参数等,优化隔震设计.

参考文献

[1] 孙建刚,王向楠,赵长军. 立式储罐基底隔震的基本理论[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(4):639-643.
(SUN Jiangang, WANG Xiangnan, ZHAO Changjun. Theoretical study on seismic isolation of storage tanks[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2010, 42(4):639-643.)
[2] 孙颖,孙建刚,崔利富. 大型立式浮顶储罐基

选取 El Centro 波作为地震动输入, $PGA=0.2\text{ g}$, 研究柱顶隔震阻尼比不同时 ($T_b=3\text{ s}$, $\xi=0.1、0.2、0.3、0.4$) 的减震效率. 计算结果如表5所示.

础隔震数值研究[J]. 世界地震工程,2011,27(3):120-125.
(SUN Ying, SUN Jiangang, CUI Lifu. Numerical research on large base isolation vertical storage tanks with floating roof[J]. World earthquake engineering, 2011, 27(3):120-125.)
[3] 孙建刚. 大型立式储罐隔震理论方法及实验[M]. 北京:科学出版社,2009.
(SUN Jiangang. Isolation of large vertical storage tank theory, method, test[M]. Beijing: Science Press, 2009.)
[4] 孙建刚,蒋峰,张荣花. 隔震立式储罐地震反应谱分析[J]. 世界地震工程,2009,25(2):130-139.
(SUN Jiangang, JIANG Feng, ZHANG Ronghua. Earthquake response spectrum analysis of storage tanks with seismic isolation[J]. World earthquake engineering, 2009, 25(2):130-139.)
[5] 崔利富. 大型储罐基础隔震与晃动控制研究[D]. 大连:大连海事大学,2012.
(CUI Lifu. Base isolation and sloshing control of large-scale LNG storage tanks[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.)
[6] 徐博,孙建刚,韩建平,等. 大型立式储罐滚动隔震限位研究[J]. 地震工程与工程振动,2017,37(2):124-131.
(XU Bo, SUN Jiangang, HAN Jianping, et al. Study on displacement limit of large vertical storage tank with rolling isolation[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2017, 37(2):124-131.)
[7] 孙建刚,崔利富,王振,等. 立式储罐滚动隔震地震模拟振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2016,36(6):92-101.
(SUN Jiangang, CUI Lifu, WANG Zhen, et al. Earthquake simulated shaking table test of ver-

- tical tank with rolling isolation[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2016, 36 (6): 92 – 101.)
- [8] 崔利富, 孙建刚, 李想, 等. 立式储罐钢筋环梁基础隔震模拟振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(6): 130 – 138. (CUI Lifu, SUN Jiangang, LI Xiang, et al. Simulation shaking table test of vertical storage tank with reinforcement ring beam base isolation[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2016, 36(6): 130 – 138.)
- [9] 刘伟斌, 崔利富, 孙建刚, 等. 桩基隔震储罐地震响应参数影响分析[J]. 低温减震技术, 2015, 8: 40 – 42. (LIU Weibin, CUI Lifu, SUN Jiangang, et al. Influence analysis of seismic response parameters of pile-based isolation storage tanks [J]. Low temperature building technology, 2015, 8: 40 – 42.)
- [10] SHENTON H W, HAMPTON F P. Seismic response of isolated elevated water tanks [J]. Journal of structural engineering, 1999, 125 (9): 965 – 976.
- [11] SHRIMALI M K, JANGID R S. Earthquake response of isolated elevated liquid storage steel tanks [J]. Journal of constructional steel research, 2003, 59: 1267 – 1288.
- [12] CURADELLI O. Seismic reliability of spherical containers retrofitted by means of energy dissipation devices[J]. Engineering structures. 2011, 33: 2662 – 2667.
- [13] 王振, 沈笑飞, 唐立强. 基础隔震高举架储油罐地震反应分析[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(6): 72 – 76. (WANG Zhen, SHEN Xiaofei, TANG Liqiang. Seismic response of base isolation highly-elevated oil storage tanks[J]. Journal of northeast forestry university, 2006, 34 (6): 72 – 76.)
- [14] 王振. 不同场地类型下基础隔震高举架储油罐减震效果分析[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(4): 52 – 62. (WANG Zhen. Analysis of the earthquake absorption effect of the base isolation highly-elevated oil storage tanks on different sites [J]. Journal of Daqing petroleum institute, 2006, 30 (4): 52 – 62.)
- [15] 肖志刚. 球形储液罐地震反应分析及减振方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. (XIAO Zhigang. Analysis of seismic response and vibration dissipated method of spherical liquid-storage tank [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.)
- [16] 戴鸿哲, 王伟, 肖志刚. 球形储液罐液 – 固耦联地震反应及减振方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4): 515 – 520. (DAI Hongzhe, WANG Wei, XIAO Zhigang. Fluid-structure interactive seismic response and vibration dissipation method of spherical liquid – storage tank [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2010, 42 (4): 515 – 520.)
- [17] 宫成欣. 球形储罐地震反应及结构控制研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007. (GONG Chengxin. Research on the earthquake response and structure control of the spherical storage tanks [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007.)
- [18] 吕远, 孙建刚, 郝进锋, 等. 高举架立式圆筒型储液容器基础隔震有限元数值仿真分析 [J]. 地震工程与工程震动, 2016, 36 (5): 126 – 131. (Lü Yuan, SUN Jiangang, HAO Jinfeng, et al. The finite element numerical simulation analysis of base isolation elevated vertical cylinder storage tanks [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2016, 36 (5): 126 – 131.)
- [19] 孙建刚, 吕远, 崔利富, 等. 高举架立式圆筒型储液容器附加粘滞阻尼器减震研究 [J]. 压力容器, 2017, 7: 19 – 28. (SUN Jiangang, Lü Yuan, CUI Lifu, et al. Researches on seismic response reduction of additional viscous damp elevated vertical cylinder storage tanks [J]. Pressure vessel technology, 2017, 7: 19 – 28.)
- [20] 张俊发. 支架式水塔水平位移的实用简化计算 [J]. 特种结构, 2004, 21 (3): 39 – 41. (ZHANG Junfa. Horizontal displacement of scaffolding towers practical simplified calculation [J]. Unique construction, 2004, 21 (3): 39 – 41.)
- [21] 孙建刚, 吕远, 崔利富, 等. 高举架立式圆筒型储液容器柱顶隔震地震动响应研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2018, 34 (6): 1017 – 1025. (SUN Jiangang, Lü Yuan, CUI Lifu, et al. Seismic response study of top isolation elevated vertical cylinder storage tanks [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34 (6): 1017 – 1025.)
- [22] 吕远. 高举架立式圆筒型储液容器减震技术及理论 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2017. (Lü Yuan. Shock absorption technology and theory of elevated vertical cylinder storage tanks [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.)