

筒仓-贮料-地基相互作用系统地震反应分析

Seismic Response Analysis of Silo-stock-foundation Interaction System

李树蔚^{1,2} 赵文¹ 国志雨³

Li Shuwei^{1,2} Wen Zhao¹ Zhiyu Guo³

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 中国·辽宁 沈阳 110004

2. 中国能源建设股份有限公司, 中国·北京 100022

3. 黑龙江省电力设计院有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150078

1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, 110004, China

2. China Energy Engineering Group CO, LTD, Beijing, 100022, China

3. Heilongjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150078, China

【摘要】为分析地震荷载作用下筒仓-贮料-地基相互作用系统的响应规律,建立了筒仓-贮料-地基相互作用系统动力模型基本方程,并通过数值分析开展不同贮料条件下的筒仓-贮料-地基相互作用系统动力特性研究。研究表明:(1)筒仓顶部位移远远大于底部,同一母线上筒仓上部和下部震动变化趋势相近。输入的地震波动越大,则结构加速度响应、位移变形和应力响应也越大;(2)筒仓几个典型部位的时程响应运动方向一致;随贮料的增加,筒仓及散料的加速度峰值先增大后减小,表明贮料与筒仓的相对运动对筒仓系统具有减震作用;(3)不同贮料量筒仓的最大环向应变及最大等效应力均出现在筒仓变截面处,即漏斗顶部;筒仓基础近区地基有效应力明显高于远区。研究结果可为控制和减少地震荷载作用下筒仓结构灾害提供可靠的理论依据和参考价值。

【Abstract】In order to analyze the response law of silo-stock-foundation interaction system under seismic load, a dynamic equation of silo-stock-foundation interaction system is established, and the dynamic characteristics of silo-stock-foundation interaction system under different storage conditions are studied through numerical analysis. Results show that: (1) the displacement at the top of the silo is far greater than that in the bottom, and the trend of the vibration of the upper and lower silos on the same bus is similar. The seismic fluctuation of the input is larger, and the acceleration response, displacement deformation and stress response are also larger. (2) the direction of time response of several typical parts of silos is consistent. With the increase of the storage material, the acceleration peak of silo and bulk material increases first and then decreases, which indicates that the relative motion of the storage material and silo has a damping effect on the silo system. (3) the maximum circumferential strain and the maximum equivalent stress of silos with different storage capacity all appear at the variable section of silos, namely the top of funnel; the effective stress of foundation near silos is obviously higher than that of far areas. The research results can provide a reliable theoretical basis and reference value for controlling and reducing the silo structure disaster under seismic load.

【关键词】筒仓-贮料-地基相互作用系统;地震反应;动力特性;动力相互作用;振动台试验;数值分析

【Keywords】silo-stock-foundation system; seismic response; dynamic characteristics; dynamic interaction; shaking table test; numerical analysis

【DOI】<http://dx.doi.org/10.26549/gcjsygl.v2i6.818>

1 引言

筒仓结构广泛应用于各类散料的储存^[1-3],而地震是造成筒仓发生失稳破坏的主要因素之一^[4-5],因此,针对地震作用下筒仓的动力特性进行研究具有重要的现实意义。目前,国内外学者针对筒仓的动力特性方面进行了大量的理论和试验研究^[6-10],但这些研究多未考虑筒仓-贮料-地基三者的相互作用,仅涉及筒仓单一结构的工程力学特性^[11-13],针对筒仓-贮料-地基相互作用系统的研究较少,相关机理也不明确,而地震荷载又是筒仓结构发生失稳破坏的主要因素之一,因此,针对地震荷载作用下筒仓-贮料-地基相互作用系统的动力特性进行研究尤为重要。

本文结合工程实例,以筒仓-贮料-地基系统为研究对象,建立不同贮料条件下筒仓-贮料-地基系统动力特性模型,并

通过数值计算对筒仓-贮料-地基系统的动力特性进行了深入的研究。研究成果可为特殊条件下(地震)筒仓结构的安全运营及抗震设计提供一定的理论依据和参考价值。

2 筒仓-贮料-地基相互作用系统动力模型基本方程

筒仓-贮料-地基相互作用系统可看作一端固定、一端自由的复合材料薄壁圆柱壳,受外部周期变化载荷 F 的作用,圆柱壳示意图及其分层情况如图1所示。圆柱壳在运动过程中各点将发生位移,在柱坐标系中用 u, v, w 表示,三个位移分量同时是空间坐标 x, θ, r 及时间 t 的函数。

2.1 几何方程

薄壁圆柱壳任一点处的应变分量与中面应变、中面弯曲挠曲率、中面扭曲率有如下关系:

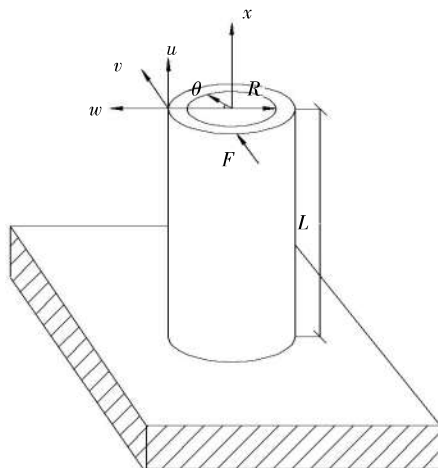


图1 壁圆柱壳示意图

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z\chi_x \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^0 + z\chi_\theta \quad (2)$$

$$\varepsilon_{x\theta} = \varepsilon_{x\theta}^0 + z\chi_{x\theta} \quad (3)$$

其中, $\varepsilon_x^0, \varepsilon_\theta^0, \varepsilon_{x\theta}^0$ 为中曲面的薄膜应变分量, χ_x, χ_θ 为中面弯曲挠曲率, $\chi_{x\theta}$ 为中面扭曲率, z 为壳体上任一点到中面的距离。

按照 Donnell 壳理论, 在中曲面应变与中曲面位移关系式中计入法向挠度一阶导数非线性项:

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta^0 = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + w \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{R \partial \theta} \right)^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{x\theta}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \theta} \quad (6)$$

其中: 下划线项表示非线性项。

Donnell 非线性壳理论中, 中面弯曲应变分量仍保持线性:

$$\chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (7)$$

$$\chi_\theta = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \quad (8)$$

$$\chi_{x\theta} = -\frac{2}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} \quad (9)$$

2.2 物理方程

考虑到复合材料的弹性模量随振动频率而变化, 两者有如下关系:

$$E_1(\omega) = E_2(\omega) = E_3(\omega) = 2.5751 \times 10^9 + \frac{2 \times 3.2283 \times 10^{12}}{\pi} \times \left[\frac{238.62}{4 \times (\omega/2\pi - 0.46787)^2 + 238.62^2} \right] \quad (10)$$

$$E_4(\omega) = 5.04289 \times 10^8 + 9.2387 \times 10^9 \times e^{-0.0064\omega/2\pi} \quad (11)$$

各向同性层叠壳第 k 层的物理方程:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \tau_{x\theta} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{x\theta} \end{bmatrix}_k \quad (12)$$

其中, Q_{ij} 为折减刚度矩阵, 元素表达式为:

$$(Q_{11})_k (Q_{22})_k = E_k(\omega) / (1 - \mu_k^2) \quad (13)$$

$$(Q_{12})_k (Q_{21})_k = E_k(\omega) \cdot \mu_k / (1 - \mu_k^2) \quad (14)$$

$$(Q_{66})_k = E_k(\omega) / 2(1 + \mu_k) \quad (15)$$

其中: $E_k(\omega)$ 为第 k 层的弹性模量, μ_k 为第 k 层的泊松比。

2.3 动力平衡方程

根据 D'Alembert 原理, 可建立层叠复合材料圆柱壳的动力平衡方程:

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} - \sum_{k=1}^4 \rho_k (z_k - z_{k-1}) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{Q_\theta}{R} - \sum_{k=1}^4 \rho_k (z_k - z_{k-1}) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} - \frac{1}{R} N_\theta + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{N_\theta}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{2N_\theta}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} - \sum_{k=1}^4 \rho_k (z_k - z_{k-1}) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c \frac{\partial w}{\partial t} - q_r = 0 \quad (18)$$

其中

$$Q_x = \frac{1}{R} \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial M_x}{\partial x} \quad (19)$$

$$Q_\theta = \frac{\partial M_\theta}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} \quad (20)$$

3 筒仓 - 贮料 - 地基动力相互作用系统数值计算

3.1 工程概况

沈阳金山热电供热工程需设置万吨筒仓 5 个, 直径 22m, 高 39.730m。根据筒仓规范确定为深仓。煤质为褐煤, 容重按 10KN/m³。抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度 0.10g, 抗震构造措施按 7 度设防, 抗震等级为二级。结构安全等级为二级; 耐火等级为二级; 地基基础设计等级为乙级, 设计使用年限为 50 年。基础持力层为中砂, 筒仓仓壁采用钢筋混凝土浇筑。结构剖面图见图 2。

3.2 材料参数

筒仓钢筋选用 HRB335 钢材, 混凝土强度等级 C40。地基从上到下土体分别为素填土(1m)、粉质粘土(5m)、中粗砂(2m)及砾砂圆砾。基础持力层为中粗砂, 地表素填土层很薄, 为简化计算将其力学参数等效为粉质粘土。筒仓贮料为褐煤。

3.3 接触及边界条件

模型选用 SPH 粒子作为节点与筒仓壁相接触, 为点-面接触类型。贮料与仓壁之间动摩擦系数为 0.5, 静摩擦系数为 0.9。地基土上表面为自由边界条件; 地基土四周设置为无反射边界条件, 以避免反射拉伸波对计算结果的影响, 并约束边界面法向位移; 地基底面节点约束法向位移及转动自由度, 释放水平方向的两个位移分量。

3.4 有限元模型

本文应用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA3D 根据工程实际尺寸 1:1 建立筒仓-地基模型,如图 3 所示,筒仓与地基间采用粘结方式进行连接,保证接触处位移的连续性,共划分单元 32640 个,节点 36656 个。数值模拟中选用兰州波作为输入地震波,兰州波时程曲线及频谱曲线如图 4 所示。

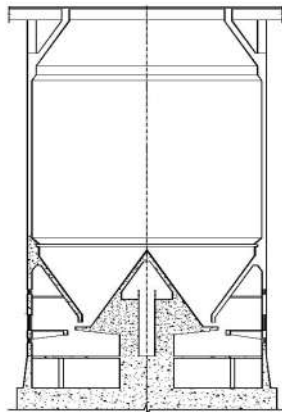


图 2 筒仓剖面示意图

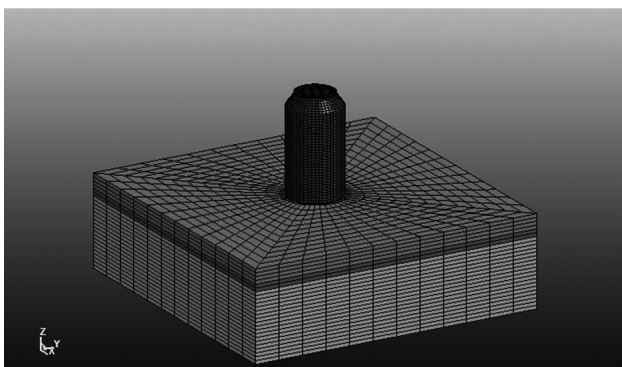


图 3 模型示意图

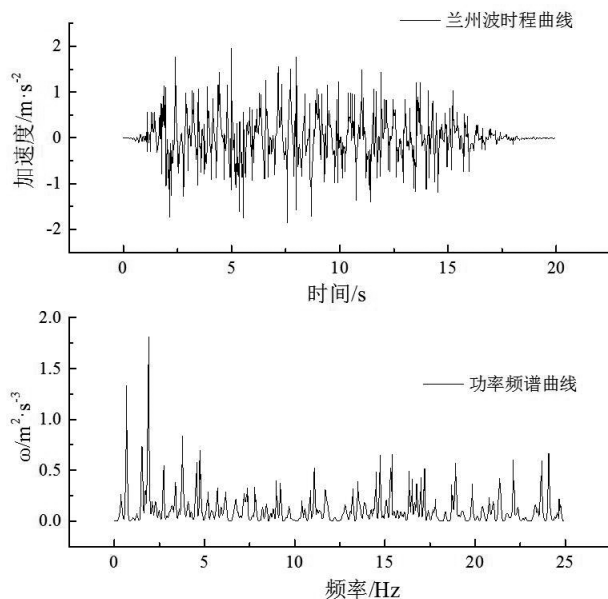
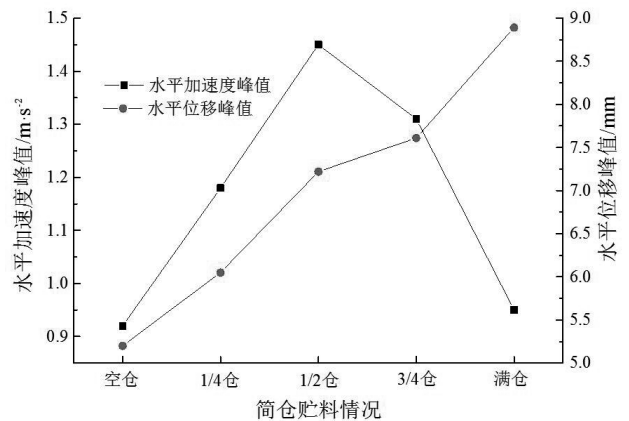


图 4 兰州波时程曲线及频谱曲线

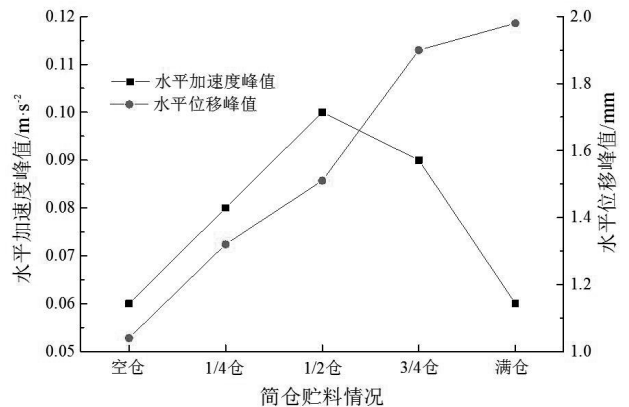
3.5 筒仓-贮料-地基相互作用系统地震响应分析

3.5.1 位移及加速度时程分析

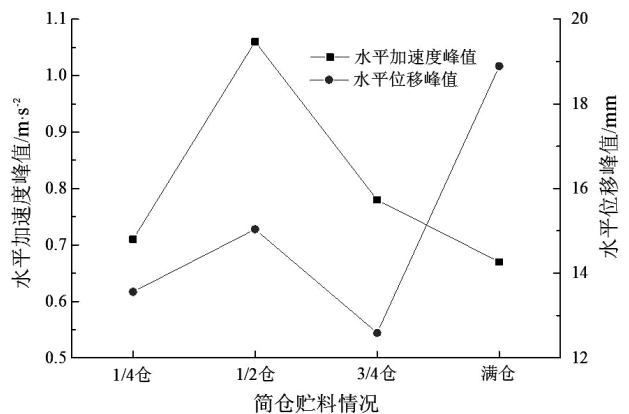
图 5 为地震波作用下,筒仓顶部节点、筒仓与地面交界处节点和贮料顶面中间位置节点的位移及加速度时程关系曲线。



(a) 筒仓顶部节点位移及加速度时程关系曲线



(b) 筒仓与地面交界处节点位移及加速度时程关系曲线



(c) 贮料顶面中间位置节点位移及加速度时程关系曲线

图 5 模型各监测点位移及加速度时程关系曲线

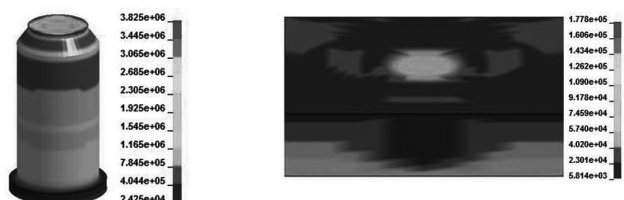
通过位移分析发现,筒仓顶部位移远远大于底部,同一母线上筒仓上部 and 下部震动变化趋势相近。输入的地震动较大,则结构加速度响应、位移变形和应力响应也较大。从整个结构来看,筒仓几个典型部位时程响应的运动方向一致,表明

仓体发生整体的摆动。

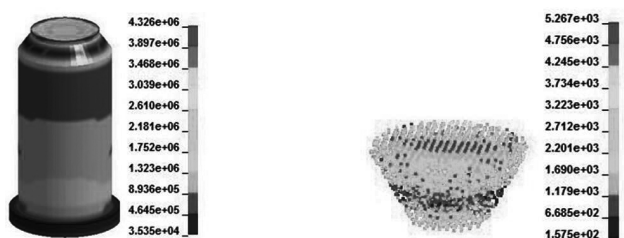
随贮料的增加,筒仓及散料的加速度峰值先增大后减小,表明贮料与筒仓的相对运动对筒仓系统具有减震作用。

3.5.2 筒仓及贮料有效应力分析

图6为不同贮料条件下,筒仓节点及贮料节点位移达到峰值时刻筒仓及贮料有效应力云图。



(a₁)空仓条件下筒仓有效应力云图 (a₂)空仓条件下地基有效应力云图



(b) 1/4 仓条件下筒仓及贮料有效应力云图



(c) 1/2 仓条件下筒仓及贮料有效应力云图



(d) 3/4 仓条件下筒仓及贮料有效应力云图



(e) 满仓条件下筒仓及贮料有效应力云图

图6 不同贮料条件下筒仓及贮料有效应力云图

从图6可以看出,不同贮料量筒仓的最大环向应变及最

大等效力均出现在筒仓变截面处,即漏斗顶部,在筒仓的设计中应对这一区域加以补强。筒仓基础近区地基有效力明显高于远区,应对基础近区地基进行加固处理,避免地基失稳的发生。

4 结语

首先筒仓顶部位移远远大于底部,同一母线上筒仓上部和下部震动变化趋势相近。结构加速度响应、位移变形和应力响应随输入地震波动的增大而增大;其次,从整个结构来看,筒仓几个典型部位时程响应的运动方向一致,表明仓体发生整体的摆动。随贮料的增加,筒仓及散料的加速度峰值先增大后减小,表明贮料与筒仓的相对运动对筒仓系统具有减震作用;最后,不同贮料量筒仓的最大环向应变及最大等效力均出现在筒仓变截面处,即漏斗顶部;筒仓基础近区地基有效力明显高于远区。

参考文献

- [1]高懿辰,邱国志.贮料材料参数对筒仓水平地震效应的影响研究[J].科学技术与工程,2017,17(01):79-84.
- [2]郭坤鹏.筒仓贮料压力分布机制及地震易损性研究[D].北京交通大学,2016.
- [3]丁花超.高架式钢板筒仓力学性能分析及设计优化研究[D].郑州大学,2016.
- [4]于洋.钢筋混凝土圆筒仓仓壁结构的地震反应分析[D].西安科技大学,2012.
- [5]袁龙飞,李晓文,白国良,康灵果,李芳.预应力混凝土圆形储煤筒仓地震反应分析[J].世界地震工程,2012,28(01):81-86.
- [6]朱贤平,高恒.钢筒仓地震作用计算方法研究与分析[J].工业建筑,2011,41(S1):378-381.
- [7]车颖文.筒仓的受力情况和稳定性研究[D].武汉理工大学,2011.
- [8]张遂见.筒承式立筒群仓结构模型模拟地震振动台试验研究[D].河南工业大学,2010.
- [9]高金锁.落地式钢筒仓地震作用分析[D].西安建筑科技大学,2009.
- [10]马超.筒仓结构—地基相互作用动力计算[D].长安大学,2008.
- [11]王命平,李玉川,刘伟.带仓顶室筒承式筒仓的自振周期及地震作用计算[J].振动与冲击,2007(08):5-8+165.
- [12]王建平,黄义.我国贮仓结构抗震研究的现状及前瞻[J].工业建筑,2005(04):79-81+90.
- [13]尹冠生.考虑结构—地基相互作用时贮仓结构的静、动力研究[D].西安建筑科技大学,2002.