

文章编号:1673-9469(2021)03-0046-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.03.007

采用隔震支座的料仓-框架结构的动力响应分析

李明政,于洋*,刘占宇,滕振超

(东北石油大学 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318)

摘要:为减缓地震作用下的料仓-框架结构的损害,结合某石化公司脱气及储存料仓-框架结构项目,利用ANSYS软件分别建立单料仓-框架结构及隔震处理结构的有限元模型,分析空仓和满仓两种工况下原结构及隔震处理结构在地震作用下的动力响应。建立料仓-框架隔震结构模型,利用振型分解反应谱法、时程分析方法分析得出在不同工况下结构的应力、位移、应变等数据。通过数据分析说明采用隔震支座能显著提高结构抗震能力,且时程分析比振型分解反应谱法分析的更加精确。

关键词:料仓-框架结构;动力响应;有限元分析;隔震支座

中图分类号:TU398

文献标识码:A

Dynamic Response Analysis of a Silo-frame Structure with Isolation Bearings

LI Mingzheng, YU Yang*, LIU Zhanyu, TENG Zhenchao

(School of civil engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: The silo-frame structure is characterized by high center of gravity, high loading, poor overall stability and local stability, which is easily damaged under earthquake. In order to mitigate the damage of the silo-frame structure under earthquake, based on the project of degasification and storage silo-frame structure of a petrochemical company, ANSYS software was used to establish the finite element models of single silo-frame structure and seismic isolation structure respectively, and the dynamic response of the original structure and seismic isolation structure was analyzed under two working conditions of empty and full silo. The data of stress, displacement and strain of the silo-frame isolated structure model under different working conditions were analyzed by using the vibration decomposition reaction spectrum method and time course analysis method. The data analysis shows that the use of vibration isolation bearings can significantly improve the seismic capacity of the structure and the time course analysis is more accurate than the vibro-decomposition reaction spectrum method. A few suggestions has been put forward for the design of future silo-frame structures.

Key words: silo-frame structure; the dynamic response; finite element analysis; isolation bearing

料仓-框架具有结构简单、制作方便等特点,因此它是被广泛应用的化工建筑结构之一。我国处于环太平洋地震带和欧亚地震带,地震灾害的频发对我国造成了严重的影响,然而由于料仓框架重心高对地震和风荷载等自然灾害十分敏感且抵抗力极差。料仓-框架作为最重要的生产产业构筑

物,一旦破坏,将给国家和人民带来巨大的经济损失,因此框架料仓抗震性能的研究尤为重要。

国内外研究人员对料仓结构进行了一系列研究,并取得了丰富的成果^[1-13],Nielsen等^[14]学者得出了纵横比,储存固体特性,填充和排放方式以及料仓使用频率的已知关键参数对料仓的影响。王

收稿日期:2021-06-29

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E018)

作者简介:李明政(1996-),男,河南三门峡人,硕士研究生,主要从事组合结构的研究。

* 通讯作者:于洋(1977-),男,黑龙江大庆人,博士,副教授,主要从事组合结构的研究。

世豪^[15]主要分析了输出储料工况下的仓壁压力并与理论值进行对比,得出了仓壁侧压力总体呈现先增大后减小的趋势,并在增大减小的过程中出现波动现象等结论。贾玲玲等^[16]学者深度分析了在二次地震作用下柱承式料仓结构的动力响应和抗震性能的研究,得出了一次地震作用下,结构的损伤较小;二次地震作用下,结构的刚度明显降低,损伤明显变大,对今后料仓的加固研究提供了依据。

为减小地震发生时料仓-框架结构的损害,本文结合某石化公司脱气及储存料仓-框架结构项目,利用 ANSYS 软件分别建立单料仓-框架结构及隔震处理结构的有限元模型,分析空仓和满仓两种工况下原结构及隔震处理结构在地震作用下的动力响应。对不同工况下料仓-框架结构的应力、位移等进行对比分析,为今后料仓-框架结构分析提出一些建议。

1 模型建立与验证

结构的长×宽×高为 9 m×9 m×39 m,其中框架部分高度 15 m,分为两层,一层高 6.2 m,二层高 8.8 m,材料为钢筋混凝土;料仓中圆柱体部分高度 24 m,直径 7.3 m,厚度 16 mm,锥体卸料部分高度 7 m,材料为 5052-H112 铝合金;料仓部分与框架部分刚性接触;料仓-框架结构各部分材料及所填物料参数如表 1 所示。

表 1 材料的力学性能参数

Tab. 1 Mechanical properties of materials

编号	材料	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
1	5052-H122 铝合金	70.0	2 720	0.3
2	C40 混凝土	32.5	2 400	0.2
3	HRB400、HRB335	200.0	7 800	0.3
4	聚丙烯 PP(颗粒)	—	910	—

注:仓内贮料以及工艺设备的质量采用 Mass21 单元模拟。

选用 GZY600 型号的铅芯橡胶隔震支座,由于其直径为 600 mm,故取 $A_b = 0.28 \text{ m}^2$ 。共布置 4 个 Combin14 弹簧单元,每根柱子布置一个,为 Y 方向;设置 8 个 Combin40 弹簧单元,每根柱子布置两个,X、Z 方向各一个,单元具体参数如表 2 所示。

利用 ANSYS 有限元软件,自底向上建立料仓-框架有限元模型,其中柱底与基础固定连接,料仓与环梁刚接并进行耦合,由点、线、面、体的形式逐步推进建模进程,结构模型如图 1 所示。

结构整体模型建立之后,按照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)要求^[17],经 ANSYS 有限元软件中 Block Lanczos 方法计算并模态分析,料仓-框架结构的水平 X 向基本自振频率为 2.951 Hz。如表 3 所示,结构模态分析结果图如图 2 所示。

表 2 弹簧隔震支座参数表

Tab. 2 Spring isolated bearing parameters table

型号	设计承载力/kN	铅芯直径/mm	等效刚度/(kN·m ⁻¹)	屈服后刚度/(kN·m ⁻¹)	屈服前刚度/(kN·m ⁻¹)	阻尼系数
GZY600	2 827	120	2 247	1 390	12 301	30 000
剪切模量/MPa	橡胶直径/mm	隔震层总高/mm	橡胶层总厚/mm	等效阻尼比/%	屈服力/kN	拉伸界限强度/MPa
0.55	600	185	22×5	23	94.2	1.5

表 3 料仓-框架结构及其带隔震支座模型结构自振频率

(单位:Hz)

Tab. 3 Self-vibration frequencies of silo-frame structures and their model structures with vibration isolation bearings

阶次	料仓-框架结构		阶次	带隔震料仓-框架结构	
	空仓	满仓		空仓	满仓
1	2.951	1.816	1	2.464	1.107
2	2.952	1.816	2	2.464	1.107
3	2.952	2.922	3	2.911	2.261
4	3.426	4.016	4	2.912	3.070
5	3.641	4.016	5	3.403	3.070
6	4.679	6.886	6	3.511	6.224
7	4.681	15.473	7	3.634	6.224
8	4.741	15.473	8	4.679	8.923
9	5.353	16.326	9	4.691	8.923
10	7.498	17.103	10	5.355	11.744

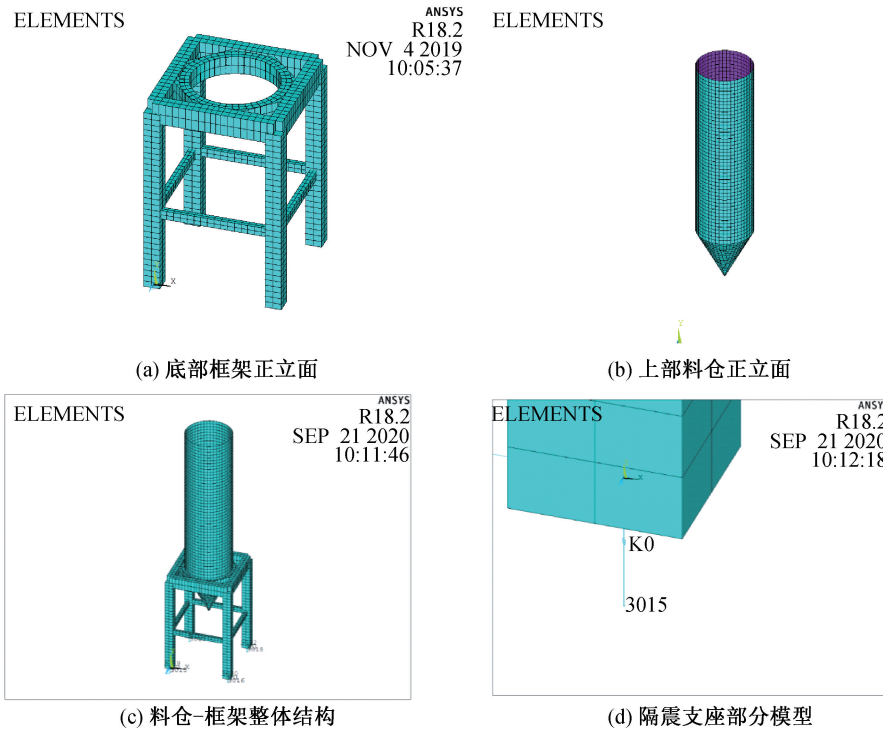


图1 料仓-框架结构模型

Fig. 1 Silo-frame structure modelling diagram

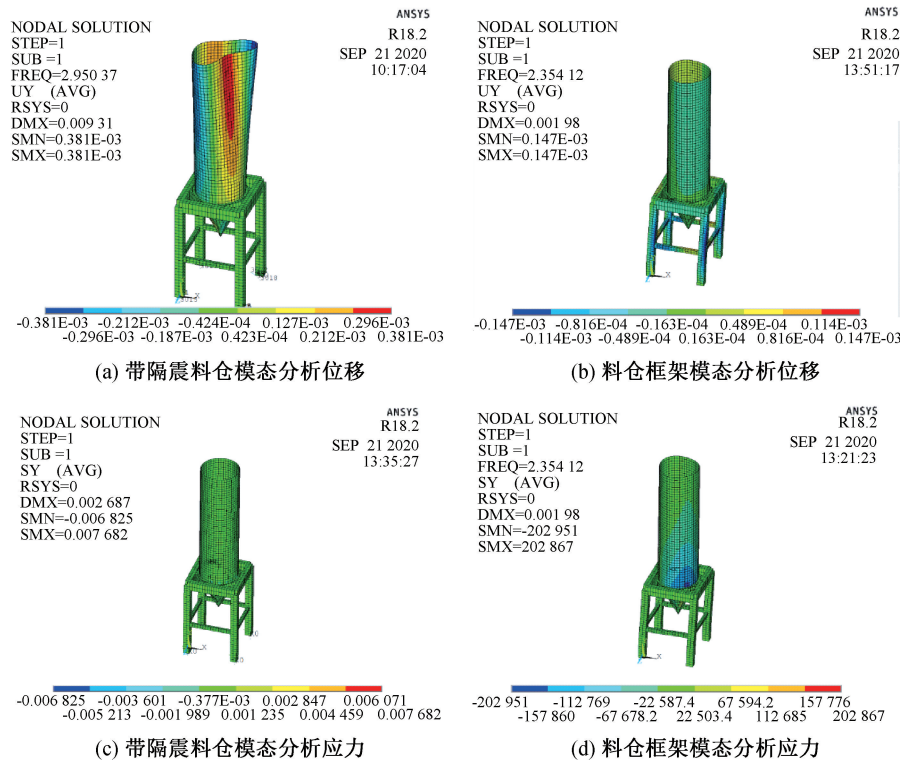


图2 模型结构模态分析结果

Fig. 2 Model structure modal analysis results

根据参考文献[1]中实验料仓的数据可知,实验得到的自振频率为 2.923 7 Hz,由有限元模拟的空仓基频为 2.951 Hz,误差为 0.93%,小于 5%;满

仓中误差为 11.9%,而参考文献中的满仓有限元结构模型与实验中的模型误差为 11.28%,产生此误差的主要原因是由于试验模型柱顶和底板相接

时,为防止混凝土和钢板粘结性较差问题,在柱底进行了配筋的加强,导致模型结构刚度的增大,基频也随之增大。因此空仓结构所造成的误差是符合实际的,模型具有分析价值。

2 带隔震支座的料仓框架结构动力响应分析

2.1 振型分解反应谱分析

按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)要求,经 ANSYS 有限元软件中 Block Lanczos 方法计算并进行模态分析,料仓-框架结构的水平 X 向基本自振频率为 2.951 Hz,如表 4 所示。

2.1.1 结构位移分析

由振型分解反应谱法计算结果可知,空料仓-框架结构基频下最大位移为 52 mm,出现在料仓顶部中点;带隔震支座空料仓-框架结构基频下最大位移为 5.1 mm,同样出现在料仓顶部中点,框架部分最大位移为 5.77 mm,出现在顶层框架角点处,带隔震支座结构框架部分最大位移为 1.13 mm。满仓中,原结构与带隔震支座结构基频下最大位移点分别为 66.6、5.4 mm,也均为料仓顶部中点;框架部分最大位移为 8.71 mm,出现在顶层框架角点处,带隔震支座结构框架部分最大位移为 1.46 mm,位置同未加隔震支座结构。并且发现料仓每一刚度变化较大高度处位移最大点随高度的增加是逐渐增大的,具体变化见图 3 所示。由图可知,料仓框架结构随高度的增加,侧移量整体是呈逐渐增大趋势。

2.1.2 结构应力分析

为了对 7 度设防烈度加速度为 0.1 g 地震作

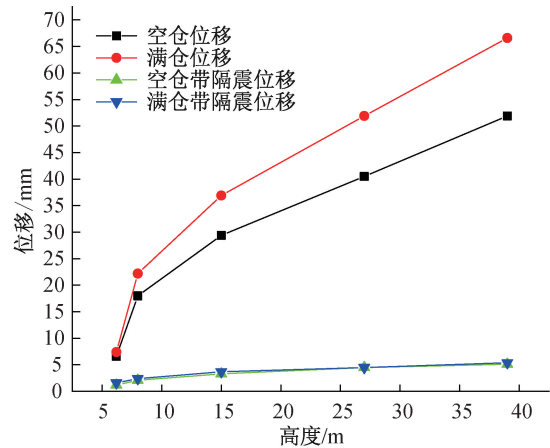


图 3 料仓-框架结构最大位移量随高度变化曲线

Fig. 3 Silo-frame structure maximum displacement curve with height

用下,料仓-框架结构和带隔震支座料仓-框架结构各关键节点进行计算,找出分析结果最大等效应力点进行验算,得出并对比加隔震支座与未加隔震支座结构的振型分解反应谱法应力作用结果。

由振型分解反应谱法计算可知,空料仓-框架原结构最大等效应力值为 13.1 MPa,带隔震支座空料仓-框架最大等效应力为 2.2 MPa;满料仓-框架原结构最大等效应力为 16.2 MPa,带隔震支座满料仓-框架最大等效应力为 3.1 MPa;最大应力值点发生在框架柱顶端四个角点处和柱底 4 个点处,八个点数值大小相等,柱顶端四个点处受应力方向为 X 轴正向,为拉应力;柱底 4 个点处受应力方向为 x 轴负方向,为压应力。结构的应力值随高度变化曲线如图 4 所示。

表 4 料仓-框架结构及其带隔震支座模型结构自振频率

(单位:Hz)

Tab. 4 Self-vibration frequencies of silo-frame structures and their model structures with vibration isolation bearings

阶次	料仓-框架结构		阶次	带隔震料仓-框架结构	
	空仓	满仓		空仓	满仓
1	2.951	1.816	1	2.464	1.107
2	2.952	1.816	2	2.464	1.107
3	2.952	2.922	3	2.911	2.261
4	3.426	4.016	4	2.912	3.070
5	3.641	4.016	5	3.403	3.070
6	4.679	6.886	6	3.511	6.224
7	4.681	15.473	7	3.634	6.224
8	4.741	15.473	8	4.679	8.923
9	5.353	16.326	9	4.691	8.923
10	7.498	17.103	10	5.355	11.744

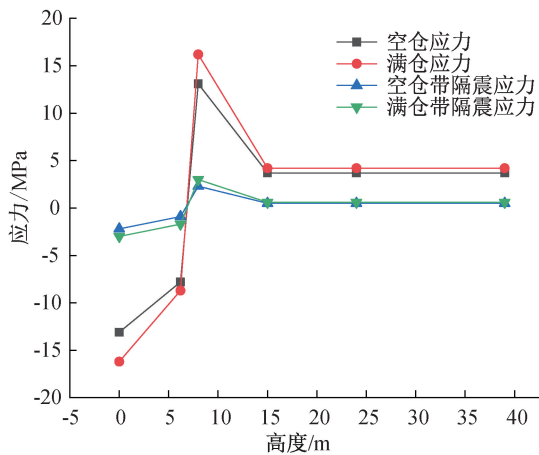
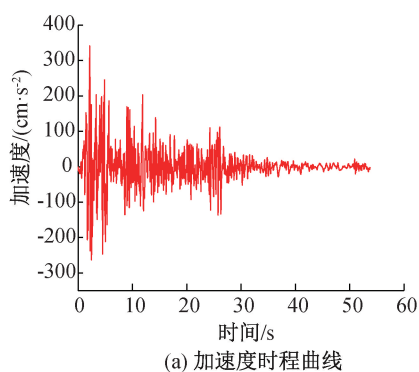


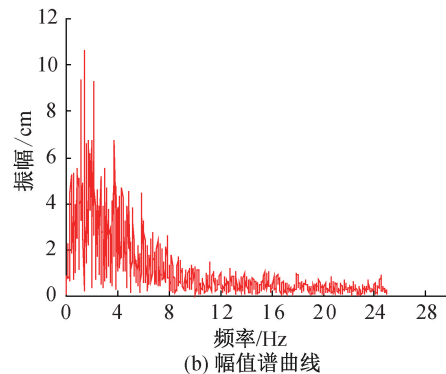
图4 料仓-框架结构所受最大应力随高度变化曲线

Fig. 4 Curves of maximum stresses on silo-frame structures as a function of height

由上可知,满仓下的位移和所受应力均比同条件下空仓要大;当料仓内质量一定时,带隔震支座料仓-框架结构上同一点所移动的位移比原结构所移动的位移有大幅度减小,所受应力也相应减小;自结构底部框架至框架柱中部结构所受应力均为压应力,中部以上为拉应力,框架柱顶端最高点处为最大值,其最大值小于 30 MPa;均满足规范



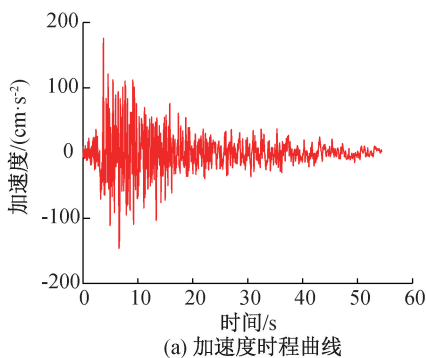
(a) 加速度时程曲线



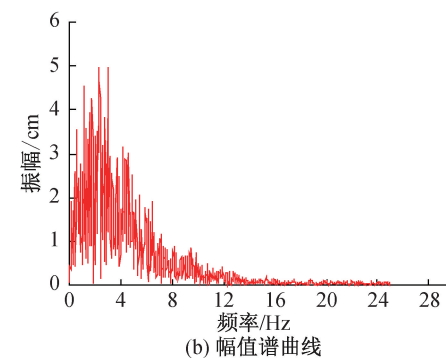
(b) 幅值谱曲线

图5 EL-Centro 波

Fig. 5 EL-Centro Waves



(a) 加速度时程曲线



(b) 幅值谱曲线

图6 Taft 波

Fig. 6 Taft Waves

要求。结构由下到上位移与应力分布合理,符合实际;结构受力最大值点处在柱顶和柱底两边缘处。

2.2 结构时程分析

2.2.1 地震波的调整与施加

本文选取符合本工程实际要求的两组天然波和一组根据场地拟合的人工波作为时程分析曲线,分别为 EL-Centro 波、Taft 波和人工波 SHM2 波,在实际计算时对选用的地震波数据进行调整,地震波峰值调整之后,结构底部剪力、结构位移限值和应力限值应符合抗震规范要求。

根据文献[18],结合料仓-框架结构基本情况,拟采用地震波参数如下:EL-Centro 波,时间间隔 0.02 s,持续时间 53.76 s,加速度峰值出现在第 2.14 s,峰值为 341.7 cm/s^2 ,场地土属 II-III 类,时程曲线和幅值谱曲线如图 5 所示;Taft 波,时间间隔 0.02 s,持续时间 54.4 s,加速度峰值出现在第 3.72 s,峰值为 175.9 cm/s^2 ,场地土属 II 类,时程曲线和幅值谱曲线如图 6 所示;地震波 SHM2,时间间隔 0.02 s,持续时间 78.64 s,加速度峰值出现在第 13 s,峰值为 35 cm/s^2 ,初始场地土属 IV 类,经过换算进行使用,其时程曲线和幅值谱曲线如图 7 所示。

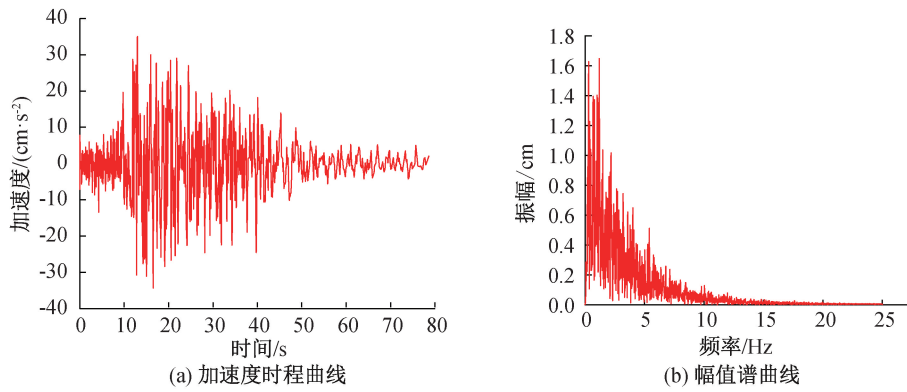


图 7 SHM2 波
Fig. 7 SHM2 Waves

根据规范^[22]推荐的方法,对加速度地震波的持续时间进行压缩。本文中输入的 EL-Centro 波持续时间为 25 s, Taft 波持续时间为 25 s, 人工波 SHM2 波持续时间为 40 s。

2.2.2 结构位移分析

利用 ANSYS 软件分别建立料仓-框架结构和带隔震支座的料仓框架结构有限元模型,采用时程分析

法,输入调整后的天然波 EL-Centro 波、Taft 波和人工波 SHM2 波,进行结构在地震作用下的动力响应分析,由结果分析可知结构所受最大位移点在料仓的顶部中点;在 7 度多遇水平地震动加速度作用下,得出数据,并且经过上文振型分解反应谱法,经过绘制数据,并将每种物料荷载工况(满仓和空仓)下的原结构和带隔震支座结构数据整合如图 8—图 10 所示。

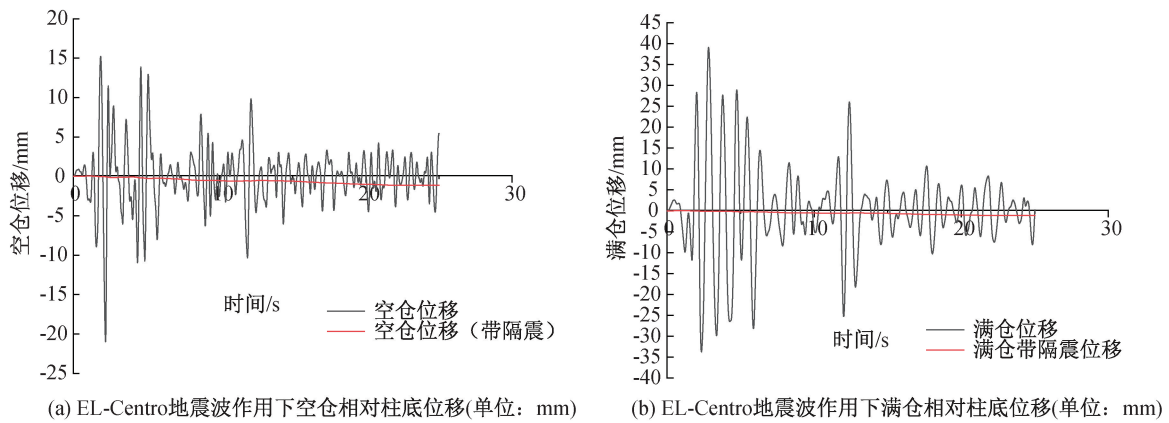


图 8 EL-Centro 波作用下结构位移
Fig. 8 EL-Centro wave displacement data

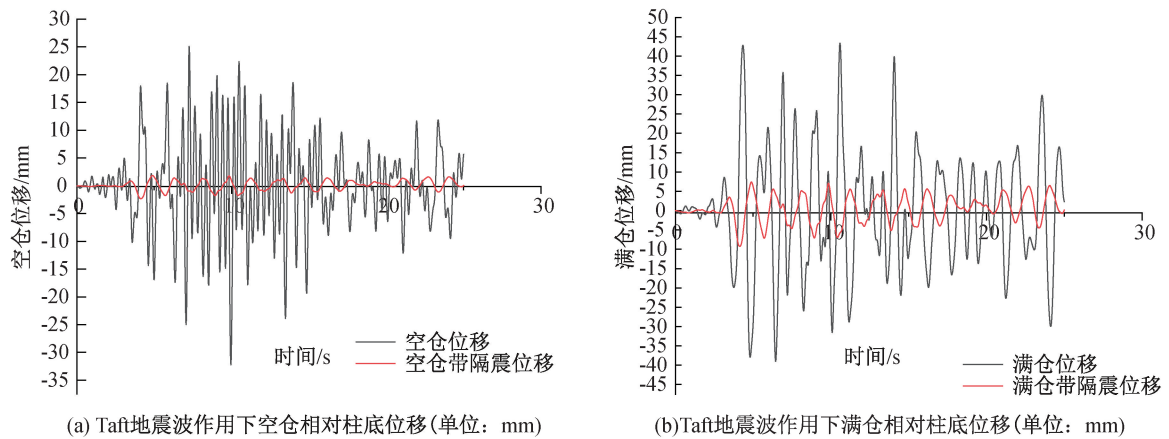
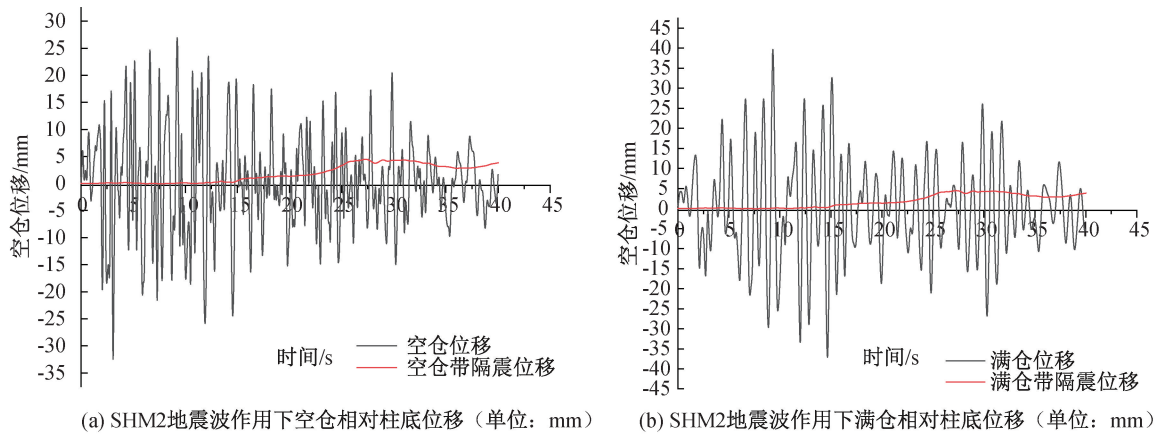


图 9 Taft 地震波作用下位移数据
Fig. 9 Taft seismic wave displacement data



(a) SHM2地震波作用下空仓相对柱底位移 (单位: mm) (b) SHM2地震波作用下满仓相对柱底位移 (单位: mm)

图 10 SHM2 地震波作用下位移

Fig. 10 SHM2 seismic wave displacement data

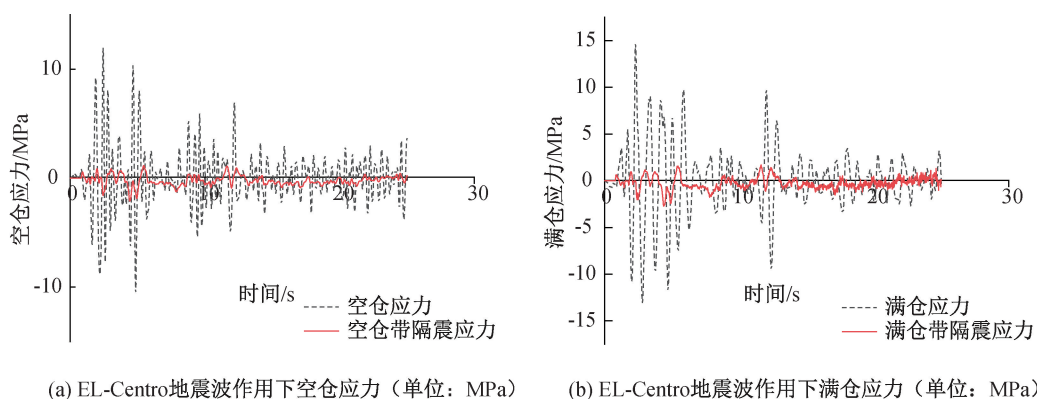
通过图 8—图 10 可知,EL-Centro 地震波作用下,空仓下结构的最大位移为 21 mm,满仓下结构的最大位移为 39.1 mm,带隔震支座空仓下结构的最大位移为 4.66 mm,带隔震支座满仓下结构的最大位移为 4.94 mm;Taft 地震波作用下,空仓下结构的最大位移为 32.3 mm,满仓下结构的最大位移为 43.4 mm,带隔震支座空仓下结构的最大位移为 8.72 mm,带隔震支座满仓下结构的最大位移为 9.26 mm;SHM2 地震波作用下,空仓下结构的最大位移为 16.2 mm,满仓下结构的最大位移为 43.4 mm,带隔震支座空仓下结构的最大位移为 4.51 mm,带隔震支座满仓下结构的最大位移为 6.01 mm。

2.2.3 结构的应力分析

采用上述三种地震波进行时程分析,由结果发现基频下结构受力最大点为 4 根框架柱顶点和底部支座处,顶点与支座处点受力数值大小相同,方向相反,底部框架值为负的,即压应力,以下本文以其中一个点,即二层框架顶部角点进行分析。

在 7 度多遇水平地震动加速度作用下,得出数据,并且经过上文振型分解反应谱法,经过绘制数据,并将每种物料荷载工况(满仓和空仓)下的原结构和带隔震支座结构应力数据整合,如图 11—图 13 所示。

通过图 11—图 13 可知,EL-Centro 地震波作用下,空仓下结构的最大应力为 12 MPa,满仓下结构的最大应力为 14.6 MPa,带隔震支座空仓下结构的最大应力为 2.02 MPa,带隔震支座满仓下结构的最大应力为 2.75 MPa;Taft 地震波作用下,空仓下结构的最大应力为 10.5 MPa,满仓下结构的最大应力为 13.8 MPa,带隔震支座空仓下结构的最大应力为 1.8 MPa,带隔震支座满仓下结构的最大应力为 2.6 MPa;SHM2 地震波作用下,空仓下结构的最大应力为 8.5 MPa,满仓下结构的最大应力为 11.1 MPa,带隔震支座空仓下结构的最大应力为 1.92 MPa,带隔震支座满仓下结构的最大应力为 2.33 MPa。



(a) EL-Centro地震波作用下空仓应力 (单位: MPa) (b) EL-Centro地震波作用下满仓应力 (单位: MPa)

图 11 EL-Centro 波作用下应力数据

Fig. 11 EL-Centro wave stress data

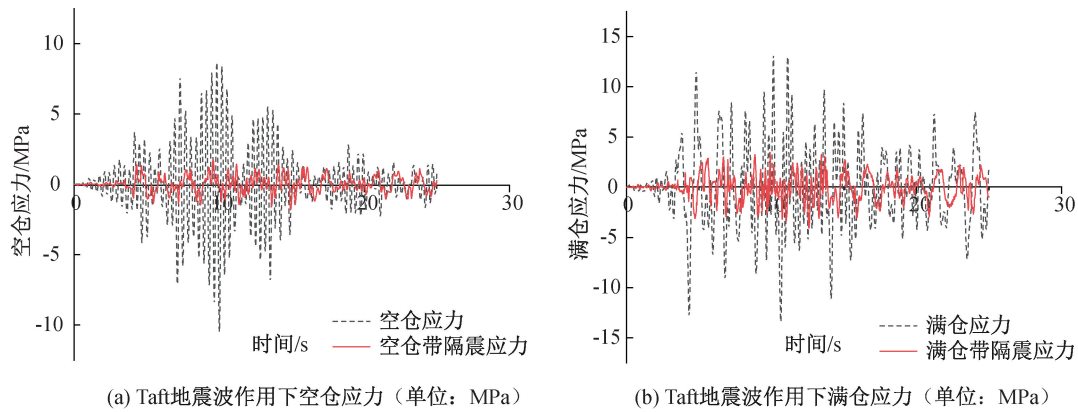


图 12 Taft 地震波作用下应力
Fig. 12 Taft seismic wave stress data

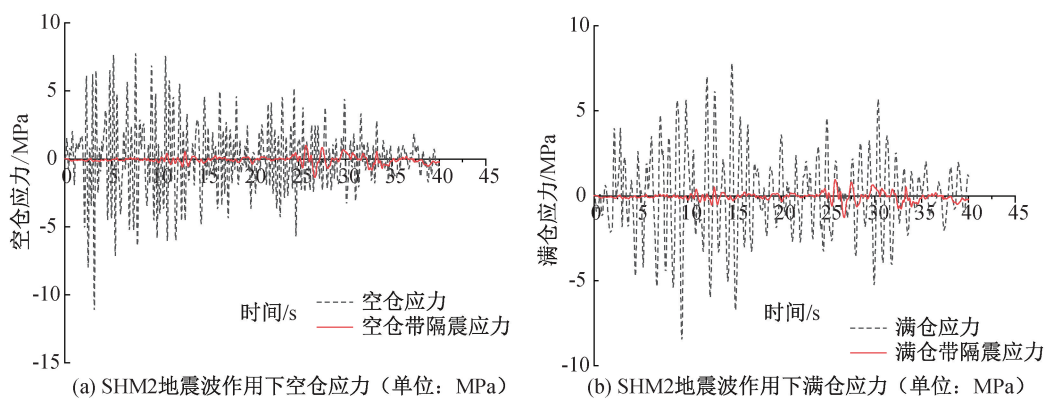


图 13 SHM2 地震波作用下应力
Fig. 13 SHM2 seismic wave stress data

3 结论

采用有限元软件 ANSYS 对料仓-框架结构进行模态分析,初步得出了结构在前 10 阶阵型下的频率,进而采用振型分解反应谱法和时程分析法计算料仓-框架结构及其带隔震支座下结构的动力响应,针对其位移和应力进行比较。经过对比得出以下结论:

1) 料仓-框架结构与带隔震支座料仓-框架结构在水平地震波作用下,料仓内物料对料仓结构在地震作用下的位移变形有比较大的影响,料仓-框架结构最大位移出现在料仓顶部;带隔震支座料仓-框架结构最大位移也出现在料仓顶部。满仓状态下的地震反应比空仓状态下的地震反应更加剧烈。因而,满仓状态对料仓结构更为不利。

2) 空仓下 EL-Centro 地震、Taft 地震波、SHM2 地震波分别约为相同点振型分解反应谱法的 40.4%、62.1%、62.3%;满仓下 EL-Centro 地震波、Taft、地震波 SHM2 地震波分别约为相同点振型分

解反应谱法的 58.7%、65.2%、65.2%;计算带隔震支座料仓-框架结构最大应力值,小于同条件下原结构按振型分解反应谱法计算最大等效应力值,空仓下,EL-Centro 地震波、Taft 地震波、SHM2 地震波分别约为振型分解反应谱法的 91.6%、80.2%、84.7%;满仓下,EL-Centro 地震波、Taft 地震波、SHM2 地震波分别约为振型分解反应谱法的 90.1%、85.2%、68.5%。由此得出结论,时程分析法的数据结果变化较小,偏于精确;振型分解反应谱法数据变化较大,偏于保守。

参考文献:

- [1] 杨建勇. 柱承式料仓振动台试验研究及数值分析[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [2] 危晓丽. 大型料仓支承框架的结构设计[J]. 建筑技术开发,2017,44(10):113-114.
- [3] PAPAGEORGIOU A V, GANTES C J. Decoupling Criteria for Inelastic Irregular Primary/Secondary Structural Systems Subject to Seismic Excitation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(10):1234-1247.
- [4] UCKAN E, AKBAS B, SHEN J, et al. Seismic Perform-

- ance of Elevated Steel Silos During Van Earthquake, October 23, 2011 [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75 (1): 265-287.
- [5] KANYILMAZ A, CASTIGLIONI C A. Reducing the Seismic Vulnerability of Existing Elevated Silos by Means of Base Isolation Devices[J]. *Engineering Structures*, 2017, 143:477-497.
- [6] BUTENWEG C, ROSIN J, HOLLER S. Analysis of Cylindrical Granular Material Silos under Seismic Excitation [J]. *Buildings*, 2017, 7(3):61.
- [7] 周长东,郭坤鹏,孟令凯,等. 钢筋混凝土料仓-散料的静力相互作用分析[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2015,43(11):1656-1661.
- [8] 周长东,张泳,邱意坤,等. 地震作用下料仓结构贮料侧压力计算方法[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2020,47(11):74-83+94.
- [9] TREMBLAY R, MITCHELL D, TINAWI R. Damage to Industrial Structures Due to the 27 February 2010 Chile Earthquake 1[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2013, 40(8):735-749.
- [10] PIERACCINI L, SILVESTRI S, TROMBETTI T. Refinements to the Silvestri's Theory for the Evaluation of the Seismic Actions in Flat-bottom Silos Containing Grain-like Material [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015, 11(13):3493-3525.
- [11] DURMUS, AYSEGUL, LIVAOGLU, et al. A Simplified 3 DOF Model of A FEM Model for Seismic Analysis of A Silo Containing Elastic Material Accounting for Soilstructure Interaction[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 77:1-14.
- [12] KANYILMAZ A, CASTIGLIONI C A. Reducing the Seismic Vulnerability of Existing Elevated Silos by Means of Base Isolation Devices[J]. *Engineering Structures*, 2017, 143:477-497.
- [13] ZAOUI D, DJERMANE M. Contribution to the Seismic Behaviour of Steel Silos; Full Finite-element Analysis Versus the Eurocode Approach[J]. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2018, 19(7):757-773.
- [14] NIELSEN J, ROTTER J M. On the Definition of Design Values for Loads on Silos and Tanks [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(16):2499-2506.
- [15] 王世豪. 料仓卸料流态及压力影响因素的细观机理研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2018.
- [16] 贾玲玲,赵真,柳春光. 柱承式料仓结构在接连二次地震作用下的动力响应和抗震性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(04):62-69.
- [17] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- [18] GB 50077—2017, 钢筋混凝土料仓设计标准[S].

(责任编辑 王利君)

(上接第 36 页)

- [10] 白晓宇,张明义,匡政,等. 全长黏结 GFRP 抗浮锚杆拉拔特性分析[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2019, 50(8):1997-2000.
- [11] 刘汉东,于新政,李国维. GFRP 锚杆拉伸力学性能试验研究[J]. *岩土力学与工程学报*, 2005, 20:3719-3723.
- [12] GB 50608—2010, 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范[S].
- [13] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [14] BARENBLATT G I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture[J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1962, 7: 55-129.
- [15] CAMANHO P P, DAVILA C G, AMBUR D R. Numerical Simulation of Delamination Growth in Composite Materials [M]. *NASA Langley Technical Report Server*, 2001.
- [16] MOËS N, BELYTSCHKO T. Extended Finite Element Method for Cohesive Crack Growth[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69(7): 813-833.
- [17] KOU H L, GUO W, ZHANG M Y. Pullout Performance of GFRP Anti-floating Anchor in Weathered Soil [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2015, 49: 408-416.
- [18] BENMOKRANE B, WANG P, TON-THAT T M, et al. Durability of Glass Fiber-reinforced Polymer Reinforcing Bars in Concrete Environment[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(3):143-153.
- [19] 张明义,张健,刘俊伟,等. 中风化花岗岩中抗浮锚杆的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(Z1): 2741-2746.
- [20] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3):339.
- [21] ARIAS J P M, VAZQUEZ A, ESCOBAR M M. Use of Sand Coating to Improve Bonding Between GFRP Bars and Concrete[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(18): 2271-2278.

(责任编辑 王利君)