

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221212001

基于IDA方法的柱承式筒仓结构地震易损性分析*

许启铿¹, 李建业¹, 刘涛², 王桂玲¹, 刘强¹, 任国旗¹

(1. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 机械工业第六设计研究院有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 易损性分析是柱承式筒仓结构开展基于性能设计研究的重要基础。为此, 选用某钢筋混凝土柱承式筒仓为研究对象, 通过有限元软件ABAQUS, 分别采用混凝土损伤塑性模型和理想弹塑性模型(Drucker-Prager)模拟筒仓结构及仓内粮食颗粒, 建立考虑粮食-仓体相互作用的柱承式筒仓非线性有限元模型。根据增量动力分析法(IDA), 按照谱相容性原则选取10条地震动记录, 分别以最大层间位移角和地面峰值加速度作为筒仓结构工程需求参数和地震动强度参数, 进行空仓、半仓、满仓三种储粮工况的柱承式筒仓结构地震易损性分析以及地震损伤风险评估。结果表明:(1)三种储粮工况下柱承式筒仓结构最大层间位移角均发生在柱顶位置, 支承柱进入塑性状态的层间位移角分别为0.015、0.013、0.011 rad;(2)储粮质量大小是决定柱承式筒仓结构损伤刚度退化的重要因素;(3)三种储粮工况下的柱承式筒仓结构均满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标;(4)满仓工况筒仓50年超越倒塌极限状态的概率为0.45%, 小于FEMA P750中定义的50年倒塌风险的限值1%。研究成果可为筒仓结构基于性能的设计研究及抗震性能评估提供依据。

关键词: 柱承式筒仓; 增量动力分析法; 易损性分析; 有限元模型; 粮食颗粒

中图分类号: TU359 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0640-09

Seismic Fragility Analysis of Column-Supported Silo Structures Based on IDA

XU Qikeng¹, LI Jianye¹, LIU Tao², WANG Guiling¹, LIU Qiang¹, REN Guoqi¹

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Sixth Design and Research Institute of Machinery Industry Co., LTD., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Fragility assessment is paramount in the pursuit of performance-based design for column-supported silo structures. In this study, a reinforced concrete column-supported silo was selected as the research object. Using the finite element software ABAQUS, both concrete damage plasticity model and Drucker-Prager ideal elasto-plastic model were utilized to simulate the silo structure and the grain particles, thus establishing a nonlinear finite element model that accounted for the interaction between grain and structure. Following the incremental dynamic analysis (IDA) method, 10 seismic records were selected based on spectral compatibility principles. The maximum inter-story drift ratio and peak ground acceleration (PGA) were respectively taken as the engineering demand parameters for silo structure and seismic intensity parameters. Seismic fragility analysis and seismic damage risk assess-

* 收稿日期:2022-12-12;修回日期:2023-04-28

基金项目:河南省科技攻关计划项目(212102310955)、河南工业大学高层次人才科研基金项目(2020BS044)资助

作者简介:许启铿(1981—),男,高级实验师,博导,博士。主要从事仓储结构及工程抗震研究。

E-mail:xuqikeng@haut.edu.cn

ment for three grain storage conditions, i.e., empty, half-full, and full, were conducted. The results show that: (1) The maximum inter-story drift ratio of the column-supported silo structure occurred at the top of the column under all three grain storage conditions, with inter-story drift ratios of 0.015, 0.013 and 0.011 radians corresponding to the plastic state of the support columns; (2) The mass of stored grain was a pivotal factor determining the degradation of structural stiffness in column-supported silo structure; (3) The column-supported silo structure under the three grain storage conditions met the seismic design objective of "no damage in minor earthquakes, repairable damage in moderate earthquakes, no collapse in major earthquakes"; (4) The probability of exceeding the collapse limit state for the silo under full storage condition over a 50-year period was 0.45%, comfortably below the 1% threshold defined in FEMA P750 for a 50-year collapse risk. These research results offer a foundation for performance-based design and seismic performance evaluation of silo structures.

Keywords: column-supported silo; incremental dynamic analysis; fragility assessment; finite element model; grain particles

0 引言

钢筋混凝土筒仓是用于贮存散体物料的一种重要构筑物,具有占地面积小、仓容量大、机械化程度高等优点。作为重要的储备和物流中转仓型,已经在粮食、煤炭、水泥等工业中广泛应用。在地震灾害下,筒仓结构的破坏和倒塌将会带来巨大的经济损失甚至人员伤亡,开展既有筒仓抗震性能和地震损伤风险评估,提高灾害风险预警和灾害应急保障能力,具有重要工程意义。

柱承式钢筋混凝土筒仓是一种典型的“上刚下柔”结构,仓下支撑柱抗侧刚度弱,且远小于上部仓体刚度,地震作用下整体结构易发生倾覆倒塌破坏。相关震害调查表明^[1-2],柱承式筒仓破坏最为严重。为此,相关学者针对其抗震性能开展了相关研究:王录民等^[3]进行了柱承式筒仓模型振动台试验,获得了其地震破坏规律;杨建勇^[4]通过柱承式筒仓模型的振动台试验,对其进行累积损伤分析,认为余震对结构损伤的影响不能被忽视;M. Yakhchalian等^[5]利用有限元软件SAP2000对柱承式筒仓进行了抗震性能分析,认为高径比对筒仓的抗震性能影响显著。显然,采用传统特定地震动参数的时程分析是无法反映地震反应的随机性和不确定性,因此从概率角度开展筒仓结构抗震性能与地震损伤评估是未来的一个方向。

地震易损性分析是基于概率估计评估结构抗震性能和地震灾害风险的重要方法,其中增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)是目前开

展结构地震易损性研究最常用的一种解析法^[6]。该方法是采用经过调幅具有多重强度的一系列地震动记录,对结构进行弹塑性时程分析,并对分析结果进行处理获得IDA曲线簇,从概率层面评价在不同地震危险性水平下的结构性能。近年来,相关学者采用IDA方法对高层混凝土框架-剪力墙结构^[7]、砌体结构^[8]、钢管混凝土桁架连续桥梁^[9]、高耸钢筋混凝土烟囱结构^[10]的地震易损性进行了分析,得出了结构的地震易损性曲线及矩阵,促进了结构地震易损性相关研究的开展。目前,在筒仓结构方面,郭坤鹏^[11]、刘华清^[12]已针对筒承式立筒仓结构开展了易损性分析,但对不同储粮工况及筒仓与粮食颗粒相互作用影响分析尚存在不足,同时柱承式筒仓与筒承式筒仓结构上差别较大,在地震作用下两者的破坏规律存在差异。因此,以柱承式筒仓为对象进行地震易损性分析是十分必要的。

本文基于IDA方法,对某既有柱承式筒仓进行地震易损性分析,得到其在空仓、半仓、满仓三种储粮工况下的地震易损性曲线和易损性矩阵,并对其抗震性能及损伤风险评估,给出在地震作用下其不同性能水平损伤风险的定量表达,为筒仓结构基于性能的设计研究及抗震性能评估提供参考。

1 有限元建模

1.1 模型工况

以上海外高桥某粮食储备库的柱承式钢筋混凝土筒仓(单仓)为原型^[3],进行有限元模型建立。筒仓总高度40.0 m,其中下部支撑柱高度8.0 m,仓

体高度 32.0 m,筒仓内径 12.0 m,仓壁厚度 0.22 m,混凝土强度为 C40,储料为小麦。支承柱纵筋为 6B25 mm,仓壁竖向配筋为 B12@200 mm,环向配筋为 B16@140 mm。结构的抗震设防信息详见表 1。模型具体尺寸如图 1 所示。

表 1 结构抗震设防信息

Table 1 Structural seismic design parameters

抗震参数	取值
抗震设防类别	丙类
抗震设防烈度	7度
设计基本地震加速度值	0.1g
设计地震分组	第一组
场地类别	IV类
场地特征周期	0.65 s

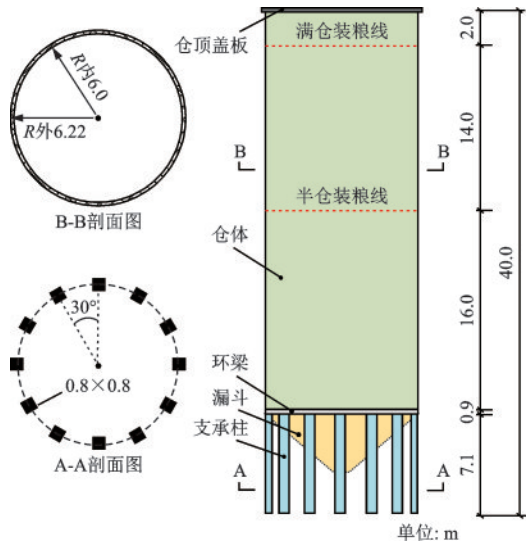


图 1 模型尺寸示意

Fig.1 Schematic diagram of the model

1.2 模型建立

采用 ABAQUS 软件,建立钢筋混凝土柱承式筒仓结构-储粮三维有限元模型。利用整体式建模方式,钢筋混凝土视为一种匀质等效材料,将钢筋弥散于混凝土单元中。柱承式筒仓结构受力复杂,采用一维杆件和二维壳体不能全面揭示结构局部细节,考虑到三维实体单元具有节点多、精度好、且模拟的构件种类多等优势,筒仓结构所有部件及粮食颗粒均采用 C3D8R 实体单元。选取 ABAQUS/Standard 提供的混凝土损伤塑性模型 (Concrete Damaged Plasticity, CDP) 作为本构模型;储粮采用理想弹塑性准则^[13] (Drucker-Prager, DP) 模拟粮食

的力学行为,储粮和筒仓之间采用面-面接触,并通过罚函数进行接触计算。

考虑钢筋和混凝土两者的泊松比较为接近,且钢筋占整比较小,结构等效泊松比取 0.2;取钢筋和混凝土两者弹性模量的体积加权平均数进行等效弹性模量的计算,等效密度则取两者密度的体积加权平均数^[14]。粮食颗粒的相关参数选用见表 2^[15]。空仓、半仓、满仓三种工况下的筒仓-粮食有限元弹塑性分析模型如图 2 所示。

表 2 粮食颗粒参数

Table 2 Parameters of stored-grains

参数	取值
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	800
弹性模量 E/MPa	25
泊松比 ν	0.3
黏聚力 c/Pa	2 000
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	40
膨胀角 $\psi/(\text{°})$	30
摩擦系数 μ	0.4

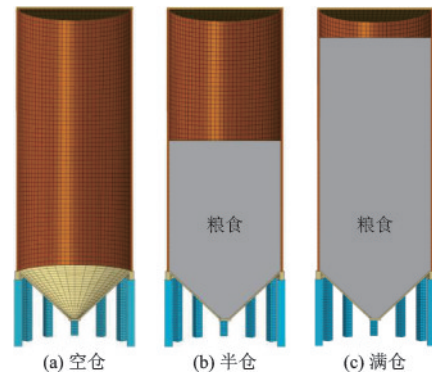


图 2 筒仓结构有限元分析模型

Fig.2 Finite element analysis model of silo structure

1.3 模型验证

采用 Lanczos 方法进行模态分析,获得筒仓模型空仓、半仓、满仓三种储粮工况的自振频率,并与文献[3]基于微粒混凝土筒仓模型振动台试验推算的原型筒仓结构对应工况的自振频率进行对比(见表 3),两者自振频率基本一致,半仓和满仓工况存在一定差异,这是由于振动台试验三种工况是依次进行的,空仓工况试验后,模型产生一定损伤造成了刚度减弱,使得自振频率有所降低。总体来看,本文建立的柱承式筒仓三维有限元能够真实反映结构动力特性,模型有效性可用于后续计算分析。

表3 不同储粮工况下筒仓自振频率对比

Table 3 Comparison of silo's natural frequencies under different grain storage conditions

工况	有限元结果/Hz	试验结果 ^[3] /Hz	误差/%
空仓	2.55	2.51	1.59
半仓	0.93	0.83	12.05
满仓	0.72	0.63	14.29

2 IDA 分析

2.1 地震波的选择及调幅

根据场地类别和设计地震分组,从太平洋地震研究中心数据库^[16]初选地震波,然后按照《建筑抗震设计规范》^[17](以下简称《抗规》)确定相应的设计反应谱,再根据筒仓结构基本周期点处对应的谱值相匹配原则,进行再次筛选。对于中高层建筑选

用10~20条地震记录能产生足够的精度评估结构抗震性能^[18],故本文选取10条地震波进行IDA分析。地震波具体信息详见表4。规范反应谱的场地设防烈度为7度,场地类别为IV类,所选择的加速度反应谱和规范设计反应谱如图3所示。

依据不同地震动强度指标与结构地震响应指标之间的相关研究^[19],以及对结构抗震分析选用地震动强度指标提供的建议,选取峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)作为柱承式筒仓结构地震动强度参数(Intensity Measure,IM)。取步长为0.1g,逐一对所选择地震记录按照等步长进行调幅,调幅后PGA为从0.1g到1.0g的10组地震加速度记录,将其作为柱承式筒仓结构地震易损性分析的输入地震波,进行空仓、半仓、满仓三种储粮工况下筒仓模型的动力弹塑性时程分析,分析工况共计300组。

表4 用于增量动力分析的地震波

Table 4 List of earthquake ground motions used for IDA of the silo

序号	地震名称	年份	地震台	震级	震中距/km	所选分量
1	Humbolt Bay	1937	Ferndale City Hall	5.8	71.57	FRN225
2	Northwest Calif-02	1941	Ferndale City Hall	6.6	91.22	FRN045
3	Borrego	1942	El Centro Array #9	6.5	56.88	B-ELC000
4	Imperial Valley-03	1951	El Centro Array #9	5.6	25.24	C-ELC000
5	Kern County	1952	Taft Lincoln School	7.36	38.89	TAF021
6	Southern Calif	1952	San Luis Obispo	6.0	73.41	SLO234
7	Northern Calif-04	1960	Ferndale City Hal	5.7	57.21	FRN224
8	Hollister-02	1961	Hollister City Hall	5.5	18.08	C-HCH181
9	Borrego Mtn	1968	San Onofre - So Cal Edison	6.63	129.11	ORR021
10	San Fernando	1971	Pasadena - Old Seismo Lab	6.61	21.5	PSL180

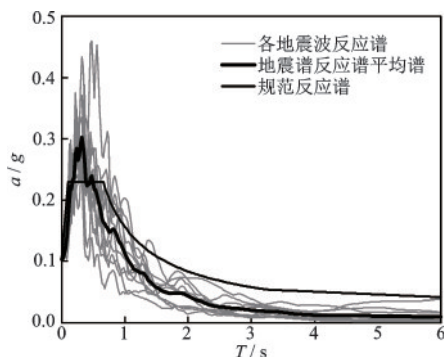


图3 所选地震波反应谱与规范谱对比

Fig.3 Comparison between selected seismic Response Spectrum and design spectrum

2.2 IDA 结果与分析

2.2.1 筒仓层间位移角

根据柱承式筒仓结构特点,选取层间位移角作为工程需求参数^[11](Engineering Demand Parameter,EDP)。考虑到地震作用下柱承式筒仓结构的受力特点,综合支承柱弯矩分布情况(上下两端弯矩较大,中部存在反弯点),将其等距划分为上部、中部、下部3个区域;环梁划分为1个区域;综合考虑空仓、半仓、满仓三种工况对应的装粮高度及对比分析的需要,将仓壁等距划分为4个区域。因此,

将筒仓结构按照高度方向共划分为8个区域,如图4所示。

以表4中7号地震波为例,得到空仓、半仓、满仓三种储粮工况下的筒仓在不同PGA下层间位移角 θ 沿筒仓高度分布情况,如图5所示。由图5可知,最大层间位移角 θ_{max} 均发生在柱顶位置,与储粮

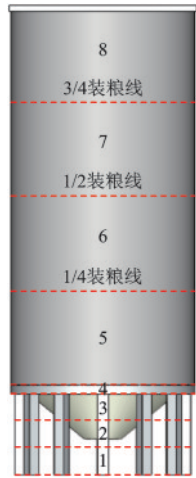


图4 柱承式筒仓结构楼层划分

Fig.4 Floor division of column-supported silo

工况、PGA大小无关。其它地震波作用下层间位移角的分布规律符合其结构特性。

2.2.2 IDA 曲线簇

提取不同PGA等级下筒仓结构的最大层间位移角 θ_{max} ,将其作为工程需求参数(EDP)。以 θ_{max} 为横轴,以PGA为纵轴,绘制空仓、半仓、满仓三种储粮工况下所有地震波的IDA曲线,如图6所示。

由图6的总体趋势来看,柱承式筒仓在空仓工况下的IDA曲线以线性为主,半仓和满仓工况下的IDA曲线均出现了明显的非线性;三种工况对应弹塑性状态分界的PGA分别为0.7g、0.4g和0.3g,对应所有地震动记录下的平均最大层间位移角 $\bar{\theta}_{max}$ 依次为0.015(1/67)、0.013(1/77)和0.011(1/91),表明随着PGA增加,储粮质量越大,筒仓结构支承柱进入非线性状态越早;在非线性阶段,满仓工况的曲线斜率最小,损伤刚度退化效应明显大于空仓、半仓,表明储粮质量大小是决定柱承式筒仓结构损伤刚度退化的重要因素,在进行其抗震性能和地震风险评估时需重点关注。

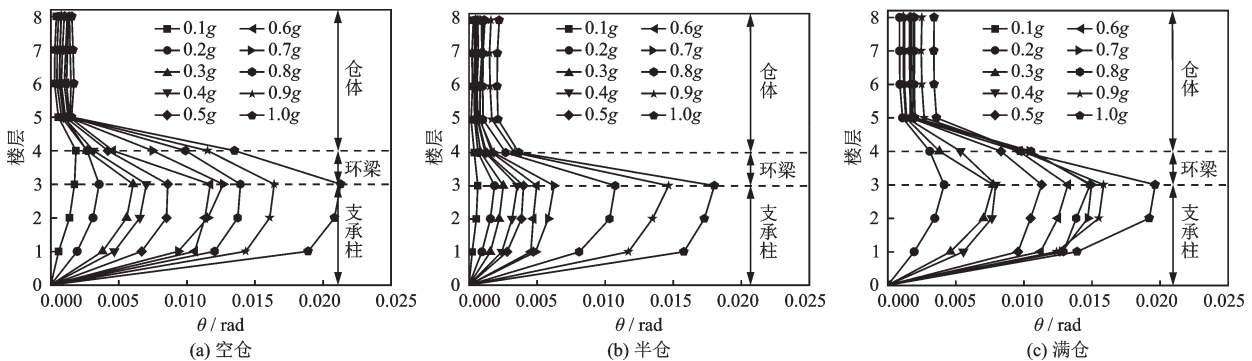


图5 筒仓层间位移角分布

Fig.5 Distribution of inter-story drift ratio of the silo

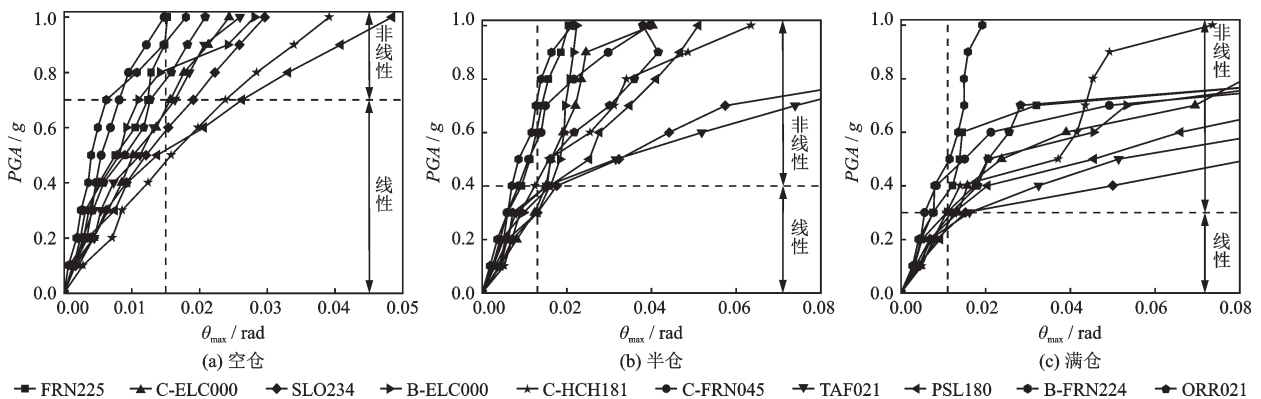


图6 IDA 曲线簇

Fig.6 IDA curve cluster

3 地震易损性分析

3.1 筒仓结构性能水准和损伤极限状态定义

采用最大层间位移角作为量化指标定义极限状态,参照文献[3]的柱承式筒仓振动台试验的损伤情况以及破坏现象,根据以上分析结果,定义柱承式筒仓结构的四个损伤极限状态 $LS_1 \sim LS_4$ 及对应的层间位移角限值,如表5所示。同时将其划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌五种性能水平^[20],表6给出了极限状态与性能水平之间的关系。

表5 筒仓不同损伤极限状态的层间位移角限值
Table 5 Limit value of inter-story drift ratio of the silo under different damage limit states

极限状态	极限状态描述	层间位移角
LS_1	结构完好,可安全使用	1/500
LS_2	结构轻度破坏	1/200
LS_3	结构遭受一定的破坏	1/60
LS_4	结构遭受严重破坏	1/40

表6 破坏等级与极限状态之间的关系
Table 6 Relationship between failure level and limit state

性能水准	层间位移角限值范围
基本完好	$\leq 1/500$
轻微破坏	(1/500, 1/200)
中等破坏	(1/200, 1/60)
严重破坏	(1/60, 1/40)
倒塌	$\geq 1/40$

3.2 筒仓结构易损性

假定在一定地震动强度下,结构的最大层间位移角服从对数正态分布^[21],根据IDA分析结果,计算给定PGA等级的最大层间位移角的对数均值 $\mu_{\ln\theta} | PGA$ 和对数标准差 $\sigma_{\ln\theta} | PGA$,记极限状态 LS_i 的层间位移角限制为 $\theta_i (i=1, 2, 3, 4)$,按照式(1)计算在给定PGA等级下最大层间位移角大于 θ_i 的概率,即获得柱承式筒仓结构四个极限状态的超越概率,绘制其空仓、半仓、满仓三种储粮工况的易损性曲线,如图7所示。

$$P(\theta_{\max} > \theta_i | PGA) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(\theta_i) - \mu_{\ln\theta} | PGA}{\sigma_{\ln\theta} | PGA} \right] \quad (1)$$

式中, θ_i 为各个极限状态所对应的柱顶位移限值; $\mu_{\ln\theta} | PGA$ 为柱顶位移的对数均值; $\sigma_{\ln\theta} | PGA$ 为对数标准差。

由图7可知,在空仓、半仓、满仓三种储粮工况下,处在轻微、中等破坏两个性能水平的柱承式筒仓结构地震易损性曲线比较陡峭,表明在地震作用下筒仓结构超过弹性层间位移角比较容易;随着筒仓破坏的进一步加深,筒仓结构从中等破坏到发生倒塌的超越概率依次减小,易损性曲线逐渐变得平缓,表明结构进入塑性状态并表现出一定的延性抗震性能;当筒仓结构进入塑性状态后,空仓、半仓、满仓三种工况发生各性能水平破坏的概率迅速增加。

根据图7,可以得出柱承式筒仓结构三种储粮工况的地震易损性矩阵,见表7。

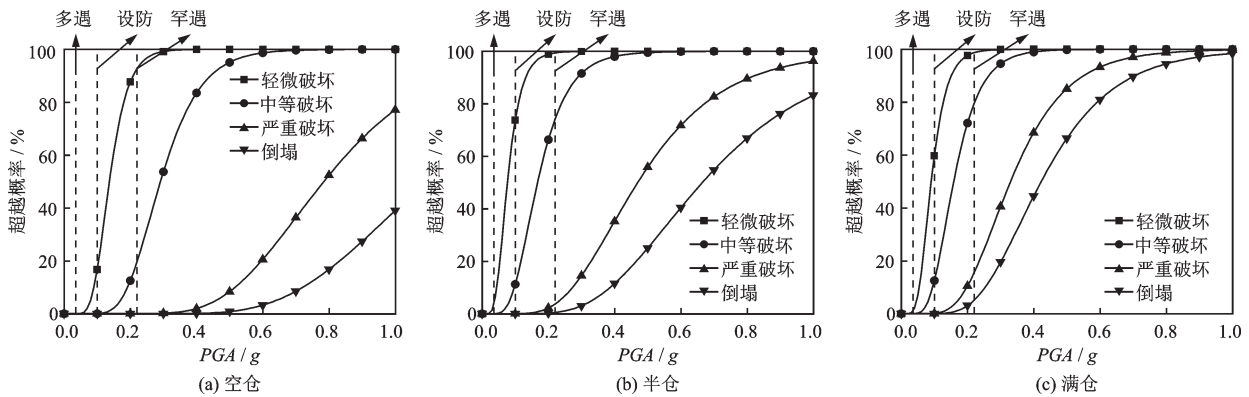


图7 筒仓地震易损性概率曲线

Fig.7 Seismic fragility probability curve of the silo

表7 不同储粮工况的筒仓地震易损性矩阵

Table 7 Seismic fragility matrix of the silo under different grain storage conditions

设防水准	储粮工况	性能水准/%				
		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
7度多遇 (0.035g)	空	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	半	96.10	3.88	0.02	0.00	0.00
	满	98.84	1.15	0.02	0.00	0.00
7度设防 (0.1g)	空	83.19	16.76	0.05	0.00	0.00
	半	26.16	62.61	11.22	0.01	0.00
	满	40.17	47.33	12.36	0.12	0.02
7度罕遇 (0.22g)	空	7.29	73.16	19.55	0.00	0.00
	半	0.63	25.32	70.37	3.22	0.45
	满	1.31	19.21	63.99	10.38	5.10

在7度多遇地震(0.035g)下,空仓、半仓、满仓三种储粮工况的柱承式筒仓保持基本完好的概率分别为100.00%、96.10%、98.84%,发生轻微破坏及中等破坏的概率较小,无严重破坏及倒塌现象。在7度设防地震(0.1g)下,筒仓发生轻微破坏和中等破坏概率大幅增加,满仓工况下分别达到了47.33%、12.36%,但结构均无明显倒塌现象。在7度罕遇地震(0.22g)下,满仓工况下筒仓以中等破坏及严重破坏为主,分别占63.99%、10.38%,发生倒塌的概率为5.10%,小于FEMA P695^[22]中定义的平均倒塌概率(10%)。因此,可认为柱承式筒仓结构在罕遇地震下仍具有一定的抗倒塌储备能力。综上所述,本文柱承式筒仓在空、半、满仓三种储粮工况下满足规范“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防要求。

由表7分析可知,满仓为最危险工况,以下针对满仓工况进行损伤风险分析。根据图6(c)满仓工况筒仓IDA曲线簇,计算筒仓结构达到各极限状态时的PGA中位值 m_R 和对数标准差 β_R ,列于表8。从表中数据可以看出,筒仓结构接近倒塌极限状态

表8 筒仓各极限状态PGA统计参数

Table 8 PGA statistical parameters for each limit state of the silo

极限状态	中位值 m_R/g	对数标准差 β_R/g
LS ₁	0.05	0.21
LS ₂	0.13	0.33
LS ₃	0.39	0.32
LS ₄	0.48	0.31

LS₄、严重破坏极限状态LS₃的PGA中位值分别为0.48g、0.39g,均高于7度设防地区罕遇地震的PGA值(0.22g)。

3.3 筒仓结构地震损伤风险分析

以柱承式筒仓结构地震易损性概率曲线为基础,按照式(2)计算筒仓结构地震年平均倒塌概率^[23],并对其进行损伤风险评估。

$$P_i = k_0 m_{R,i}^{-k} \exp\left(\frac{1}{2} k^2 \beta_{R,i}^2\right) \quad (2)$$

式中, $m_{R,i}$ 和 $\beta_{R,i}$ 分别为各极限状态的中位值和对数标准差; k_0 和 k 为形状参数,可通过式(3)和式(4)计算:

$$k = \frac{\ln(v_{DBE}/v_{MCE})}{\ln(I_{MCE}/I_{DBE})} \quad (3)$$

$$k_0 = v_{DBE} (I_{DBE})^k \quad (4)$$

式中, v_{DBE} 、 v_{MCE} 分别为设防地震和罕遇地震的年超越概率; I_{DBE} 和 I_{MCE} 分别为设防地震和罕遇地震的地震动强度参数。

根据《抗规》^[17],设防和罕遇地震的50年超越概率分别为10.0%和2.0%,即得到筒仓的设防地震年超越概率为0.21%,罕遇地震超越概率为0.04%,通过式(3)和式(4)可得 k_0 为 1.7078×10^{-5} , k 为2.1079。将式(2)中的 $m_{R,i}$ 和 $\beta_{R,i}$ 替换为表8所列的结构在LS₁~LS₄四个极限状态的易损性函数中位值 $m_{R,i}$ 和 $\beta_{R,i}$ ($i=1,2,3,4$),可得到柱承式筒仓结构在达到四个极限状态的年超越概率 P_i ($i=1,2,3,4$)。

再由式(5)计算各极限状态50年的超越风险概率:

$$P_{50} = 1 - (1 - P_i)^{50} \quad (5)$$

式中, P_i 和 P_{50} 为柱承式筒仓结构达到某种极限状态的年超越概率和50年超越概率。柱承式筒仓结构地震损伤风险列于表9。

表9 筒仓损伤风险

Table 9 Silo damage risk

极限状态	年超越概率/%	50年超越概率/%
LS ₁	0.88	35.98
LS ₂	0.16	7.69
LS ₃	0.016	0.78
LS ₄	0.009	0.45

由表9可知,满仓工况下柱承式筒仓在50年内达到 LS_1 的超越概率为35.98%,达到 LS_2 的概率为7.69%,达到 LS_3 的概率为0.78%,达到 LS_4 的概率为0.45%。由于目前我国规范中缺少用于结构抗震设计的倒塌风险控制目标,本文将该筒仓达到 LS_4 的50年倒塌概率与美国NEHRP抗震设计规范FE-MA P750^[24]中定义的50年倒塌风险的限制(1%)对比,对比结果表明该柱承式筒仓抗震设计安全度高,抗震性能良好。

4 结 论

(1)通过对空仓、半仓、满仓三种储粮工况的柱承式筒仓结构进行动力时程分析,其最大层间位移角 θ_{max} 均发生在柱顶位置,与储粮工况、地震动峰值加速度大小无关。

(2)随着PGA增加,储粮质量越大,筒仓结构支承柱进入非线性状态越早,在非线形阶段,满仓工况损伤刚度退化效应明显大于空仓、半仓,表明储粮质量大小是决定柱承式筒仓结构损伤刚度退化的重要因素。

(3)柱承式筒仓7度罕遇地震下发生倒塌的最大概率小于10%,均满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防要求,具有一定的抗倒塌储备能力。

(4)通过地震损伤风险分析,柱承式筒仓结构50年倒塌风险为0.45%,低于美国规范定义的限制(1%),筒仓抗震设计安全度较高,抗震性能良好。

参考文献:

[1] “5·12”汶川地震房屋震害研究专家组.“5·12”汶川地震房屋建筑震害分析与对策研究报告[J].四川建筑,2009,29(增1):6-8,11.
“5·12” Wenchuan earthquake housing damage research group. “5·12” Report on Analysis and countermeasure of building damage in Wenchuan Earthquake[J]. Sichuan Architecture, 2009,29(Sup1):6-8,11. (in Chinese)

[2] Dogangun A, Karaca Z, Durmus A, et al. Cause of damage and failures in silo structures[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, 23(2): 65-71.

[3] 王录民,张华,卢文胜,等.柱承式群仓结构模型模拟地

震振动台试验研究[J].建筑结构,2010,40(10):41-43.
Wang L M, Zhang H, Lu W S, et al. Study of shaking table tests on the model of group silos structures [J]. Building Structure, 2010,40(10): 41-43. (in Chinese)

[4] 杨建勇.柱承式筒仓振动台试验研究及数值分析[D].大连:大连理工大学,2018.
Yang J Y. Shaking table test and numerical analysis of column bearing silos [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)

[5] Yakhchalian M, Nateghi F. Seismic behavior of silos with different height to diameter ratios considering granular material-structure interaction[J]. International Journal of Engineering, 2012, 25(1): 27-38.

[6] 吕西林,苏宁粉,周颖.复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J].地震工程与工程振动,2012,32(5):19-25.
Lyu X L, Su N F, Zhou Y. IDA-based seismic fragility analysis of a complex high-rise structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(5): 19-25. (in Chinese)

[7] 张令心,徐梓洋,刘洁平,等.基于增量动力分析的超高层混合结构地震易损性分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):19-25.
Zhang L X, Xu Z Y, Liu J P, et al. Seismic Fragility analysis of super high-rise hybrid structures based on incremental dynamic analysis [J]. Journal of Building Structures, 2016,37(9): 19-25. (in Chinese)

[8] 张海,孟亚翠,田丽媛.基于IDA砌体结构地震易损性影响因素研究[J].防灾减灾工程学报,2017,37(1):49-53.
Zhang H, Meng Y C, Tian L Y. Seismic vulnerability factors analysis of masonry structure based on IDA [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017,37(1): 49-53. (in Chinese)

[9] 王海良,张铎,刘中宪.基于IDA钢管混凝土桁架连续曲线桥抗震易损性分析[J].防灾减灾工程学报,2017,37(1):39-48.
Wang H L, Zhang D, Liu Z X. Evaluation of seismic fragility of CFST and continuous curved bridge using IDA [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017,37(1): 39-48. (in Chinese)

[10] 周长东,田苗旺,张许,等.考虑多维地震作用的高耸钢筋混凝土烟囱结构易损性分析[J].土木工程学报,2017,50(3):54-64.
Zhou C D, Tian M W, Zhang X, et al. Seismic fragility analysis for high-rise RC chimney considering multi-

- dimensional seismic actions[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 54-64. (in Chinese)
- [11] 郭坤鹏. 筒仓储粮压力分布机制及地震易损性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
Guo K P. Lateral pressure distribution and seismic fragility assessment of the circular silo [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [12] 刘华清. 静动荷载作用下预应力筒仓地震易损性研究[D]. 郑州: 河南大学, 2022.
Liu H Q. Seismic fragility research of prestressed silos under static and dynamic loads [D]. Zhengzhou: Henan University, 2022. (in Chinese)
- [13] 邓楚键, 何国杰, 郑颖人. 基于M-C准则的D-P系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 735-739.
Deng C J, He G J, Zheng Y R. Studies on drucker-prager yield criterions based on M-C yield criterion and application in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 735-739. (in Chinese)
- [14] 王丽坤. 散装粮食楼房仓主要功能实现与结构性能研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010.
Wang L K. Research of structural property and realization of main function in loose-packed grain building warehouse [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [15] 郭祝辉. 偏心卸料筒仓与粮食散体材料相互作用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
Guo Z H. Research on Silograin interaction under eccentric discharge [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database [DB/OL]. California: Berkeley, http://p-eer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database.
- [17] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] Luco N, Cornell C A. Effects of connection fractures on SMRF seismic drift demands [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(1): 127-136.
- [19] Shome N, Cornell C A. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [M]. Stanford: Stanford University, 1999.
- [20] 吕静, 刘文锋, 王晶. 钢筋混凝土框架结构抗震性能目标的量化研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(5): 80-86.
Lyu J, Liu W F, Wang J. Quantization research on seismic performance target of reinforced concrete frames [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(5): 80-86. (in Chinese)
- [21] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [22] FEMA P 695 Quantification of building seismic performance factors [R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [23] 周洲, 吕大刚, 于晓辉. 基于文献调研的(我)国建筑结构地震倒塌风险概率评估 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8): 1-18.
Zhou Z, Lyu D G, Yu X H. Probabilistic assessment of seismic collapse risk for building structures in China based on literature investigation [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(8): 1-18. (in Chinese)
- [24] Building Seismic Safety Council (BSSC). NEHRP recommended provisions for regulations for new buildings and other structures: FEMA P750 [S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2010.

(本文编辑: 苏泽云)