

中文引用格式:罗勇哲,张家浩,滕振超,等. 基础隔震装置减少框架-高架筒仓地震易损性研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 72-80.

英文引用格式:LUO Yongzhe, ZHANG Jiahao, TENG Zhenchao, et al. Study on reduction of seismic vulnerability of frame-elevated silo by base isolation, 2025, 35(11): 72-80.

基础隔震装置减少框架-高架筒仓地震易损性研究^{*}

罗勇哲¹高级工程师, 张家浩^{**2}, 滕振超²教授, 计静²教授

(1 大庆石化工程有限公司, 黑龙江 大庆 163714;

2 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

中图分类号: X924.4

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.1388

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目资助(LH2020E018); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2020007)。

【摘要】 为降低高架筒仓结构地震倒塌风险, 以某光伏级乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)包装楼工程为研究对象, 基于增量动力分析(IDA)法构建基础隔震有限元模型, 并开展地震易损性分析; 选取最大层间位移角作为工程需求参数(EDP)、地面峰值加速度(PGA)作为地震动强度参数(IM), 对比分析原结构与隔震结构的抗震性能及失效概率。研究表明: 在罕遇地震($PGA = 0.22g$)作用下, 通过基础隔震装置降低层间位移角峰值65.8%(X向)与51.07%(Y向), 有效抑制塑性铰时序发展, 消除软弱层倒塌机制; 在罕遇地震作用下, 隔震结构倒塌概率由3.63%显著降至0.173%; 基础隔震装置相较于原结构能更好抵御小概率地震事件引起的倒塌风险。

【关键词】 基础隔震装置; 框架-高架筒仓; 筒仓结构; 地震易损性; 增量动力分析(IDA); 罕遇地震

Study on reduction of seismic vulnerability of frame-elevated silo by base isolation

LUO Yongzhe¹, ZHANG Jiahao², TENG Zhenchao², JI Jing²

(1 Daqing Petrochemical Engineering Co., Ltd., Daqing Heilongjiang 163714, China;

2 School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University,
Daqing Heilongjiang 163318, China)

Abstract: To mitigate the seismic collapse risks of elevated silo structures, this study adopted base isolation devices to enhance their seismic performance. A photovoltaic-grade ethylene-vinyl acetate (EVA) packaging project was selected as the research object. A finite element model incorporating base isolation was developed using IDA, and seismic fragility analysis was conducted. The maximum inter-story drift ratio was selected as the Engineering Demand Parameter (EDP), while Peak Ground Acceleration (PGA) was adopted as the Intensity Measure (IM). The seismic performance and failure probability of the original

* 文章编号: 1003-3033(2025)11-0072-09; 收稿日期: 2025-06-18; 修稿日期: 2025-08-22

** 通信作者: 张家浩(2001—), 男, 广东江门人, 硕士研究生, 主要研究方向为油气田地面建设工程、防灾减灾。E-mail: zhang_jh_nepu@163.com。

structure and the base-isolated structure were compared and analyzed. The results demonstrate that under the rare earthquake ($PGA = 0.22 g$), peak inter-story drift ratios are reduced by 65.8% (X-direction) and 51.07% (Y-direction) through base isolation. Furthermore, the progression of plastic hinges is effectively suppressed, and the soft-story collapse mechanism is eliminated. Under the rare earthquake, the collapse probability of the base-isolated structure is significantly reduced from 3.63% to 0.173%. Compared to the original structure, the base-isolated structure exhibits significantly better capability in resisting collapse risks induced by low-probability seismic events. This research provides a theoretical foundation and practical guidelines for the seismic isolation design of elevated silo structures.

Keywords: base isolation device; frame-supported elevated silo; silo structures; seismic vulnerability; incremental dynamic analysis (IDA); rare earthquake

0 引言

筒仓作为工业领域中的多功能储存单元,广泛应用于各类物料的储藏,包括但不限于谷物、水泥、煤粉以及塑料颗粒等。通过框架或支承柱进行架高的称为高架筒仓。鉴于物料卸载工艺要求,储罐常采用高位布置,导致支承结构承受显著增大的倾覆弯矩,立柱轴压比随之提升,易诱发压弯耦合失稳^[1]。美国土木工程师协会因筒仓承受多种荷载条件、具有不同寻常的倒塌模式,将其视为非建筑特种结构。筒仓结构的失效往往导致灾难性的全面倒塌,主要由于圆柱壳体设计不具备足够的结构冗余,在局部损伤后缺乏有效的荷载重分配机制。这种结构的破坏不仅会导致物料损失,还可能造成人员伤亡并波及邻近设施引发连锁损害^[2]。地震作用是筒仓结构失效的主要原因,频发小震事件会诱发关键构件受损(如柱脚环梁节点、仓壁连接),引发连锁性生产中断^[3]。历次震害表明:筒仓结构底部断裂是弯曲超限引发支撑系统应力集中,导致局部屈曲与节点失效的链式破坏过程^[4]。地震造成的损害凸显了高架筒仓的脆弱性,迫切需要找到有效的改造解决方案以避免未来灾难^[5]。

近年来,国内外许多学者研究了筒仓结构的抗震性能和改造设计。PHAN 等^[6]使用凹面滑动轴承系统对液化气储罐进行地震保护,通过地震易损性分析评估得出,隔震系统在预期地震强度范围内能有效降低储罐损害。PAOLACCI^[7]分析和评估了隔震系统——高阻尼橡胶支座和摩擦摆隔震器在提升式钢制储罐地震防护中的有效性,得出高阻尼橡胶支座和摩擦摆系统都能显著减少储罐响应,尤其是基础剪力和罐壁的应力水平。GIANNINI 等^[8]通过振动台试验评估了钢制液体储罐基底隔震系统的有效性,结果表明:隔震系统能有效减少储罐壁上的压

力。CASTIGLIONI 等^[9]采用实体单元和简化分布质量模型非线性动力分析筒仓结构,结果表明:尽管集中质量方法不能以适当的精度模拟筒仓壁的局部行为,但能合理地模拟结构的全局响应。在国内相关研究中,许启铿等^[10]采用混凝土损伤塑性模型和理想弹塑性模型模拟了筒仓结构和粮食颗粒,根据增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)法选取多条地震动记录进行动力弹塑性时程分析,得出储粮质量是影响筒仓结构损伤刚度退化的重要因素,高架筒仓的最大层间位移角均出现在柱顶位置。王录民等^[11]采用 1/16 的立筒群仓结构整体模型进行振动台模拟地震试验,筒仓模型结构顶部的动力反应大于底部,存在鞭梢效应,环梁附近抗侧刚度变化大,是结构薄弱部位。李葱葱等^[12]建立了不同设防烈度和层数的典型框架结构模型,并分析动力增量时程,用于评估典型框架结构在不同地震作用下的破坏特性。段红杰等^[13]利用有限元软件分析了筒仓力学行为,得出筒仓的最大应力和变形与直径、厚度、高度及外部荷载有关,其中粮压影响最大。尽管已广泛研究了筒仓结构的抗震性能试验,但现有文献对高架筒仓进行基础隔震装置改造的应用很少,尤其缺乏实际工程案例的系统性分析,其隔震机制与设计方法亟待深入探究。

鉴于此,笔者拟选取位于连云港市徐圩石化新区的乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(Ethylene-Vinyl Acetate, EVA)包装楼为研究对象,建立框架-高架筒仓三维有限元整体模型,采用分布质量法等等效储料惯性效应并施加储料静态压力分布,以预测整体动力响应行为;采用基础隔震装置改造包装楼,基于 IDA 法进行地震易损性分析,评估改造措施的有效性,以期为该类型筒仓结构隔震改造设计提供参考,加快双碳进程,为我国高端聚合物产业发展提供支撑。

1 框架-高架筒仓有限元模型

1.1 EVA 共聚物包装楼工程概况

以连云港石化产业基地 20 万 t/a 光伏级 EVA 共聚物包装楼为研究对象建立有限元模型。结构底部为 6 层混凝土支承框架高 30.30 m,在顶层共支撑筒仓 12 个,30.30~65.30 m 为钢框架工作平台(图 1)。筒仓总高度为 25.0 m,筒仓内径为 6.20 m,仓壁厚度为 16 mm,混凝土强度为 C40。储料为 EVA 颗粒,储料重力密度为 9.50 kN/m³,储料与仓

壁的摩擦因数 μ 为 0.4,内摩擦角为 35°,结构的抗震设防信息见表 1。

表 1 结构抗震设防信息

Table 1 Structural seismic design parameters	
抗震参数	设防信息
抗震设防类别	丙
抗震设防烈度/(°)	7
基本地震加速度/ g	0.10
设计地震分组	第Ⅲ组
场地类别	Ⅳ
场地特征周期/ s	0.90

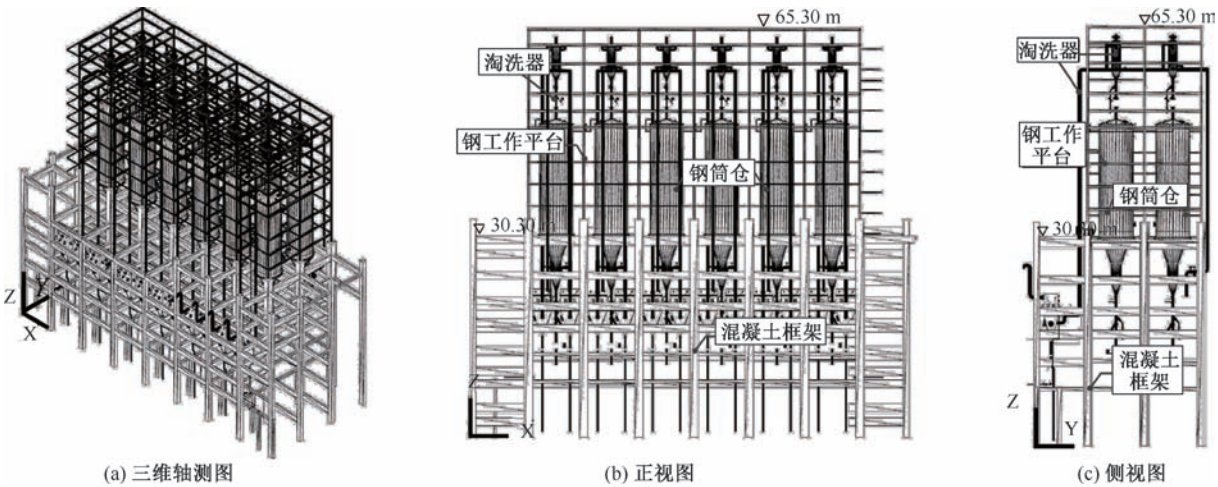


图 1 框架支承式-高架筒仓(群仓)模型

Fig. 1 Frame-supported elevated silo (group silo) model

1.2 等效质量模型-原结构

由于高架筒仓的薄弱部位是支承框架及其环梁附近,因此,采用简化的等效质量法模拟仓内物料,评估结构的整体响应。使用 Midas-Gen 软件建立有限元模型,其中,筒仓壁和连接板采用板单元模拟,

并进行网格加密处理,钢平台与混凝土框架采用梁单元模拟。根据结构节点详图定义钢梁的边界条件,首层柱底被视为固定端约束,连接板与环梁之间被视为刚性连接,筒仓顶部通过质量源刚性连接进行模拟(图 2)。

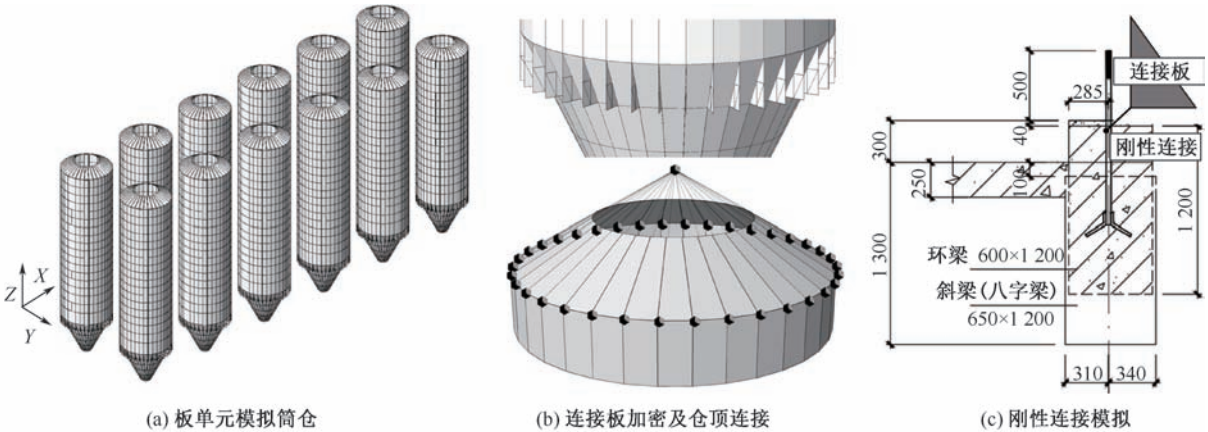


图 2 筒仓模型处理

Fig. 2 Silo model processing

为精确模拟结构的损伤效应与变形机制,采用基于纤维截面的分布塑性模型模拟框架单元的非线性行为。通过直接积分截面纤维材料的本构响应,克服传统集中塑性铰模型无法反映塑性区扩展的固有缺陷,直接从材料的本构关系出发得到结构非线性性能^[14]。

混凝土骨架曲线采用 Kent-Park 模型,钢材骨架曲线采用双折线模型。根据文献介绍的简化方法,用静压和集中分布质量模拟筒仓,静载下假设为完全充满以模拟地震最不利情况^[15]。沿筒仓高度划分区域,将 655 t/仓的总质量通过刚性连接到筒仓壁不同水平位置上,筒仓壁自重由自重系数添加。

由于储料计算高度 h 与仓内径 d 之比大于 1.5,储料荷载按深仓计算。根据《钢筋混凝土筒仓设计规范》^[16] 规定,作用于仓壁上储料压力标准值应按下式计算:

$$\text{仓壁水平压力 } P_h = C_h \frac{\gamma \rho}{\mu} (1 - \exp(-\mu ks/\rho))$$

(1)

竖向压力 $P_v = C_v \frac{\gamma \rho}{\mu k} (1 - \exp(-\mu kh/\rho))$

(2)

仓壁摩擦

$$P_f = \rho [\gamma s - \gamma \rho (1 - \exp(-\mu ks/\rho)) / \mu k]$$

(3)

漏斗切向力 $P_t = C_v P_v (1 - k) \sin \alpha \cos \alpha$

(4)

漏斗法向力 $P_n = P_v (\cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha)$

(5)

式中: C_h 、 C_v 为深仓储料水平和竖向压力修正系数; γ 为储料重力密度, kN/m^3 ; μ 为储料对仓壁摩擦因数; ρ 为水力半径, m ; k 为侧压力系数; s 为储料顶面至计算截面处距离, m ; α 为漏斗壁与水平面倾角。

1.3 有限元模型验证

基于 Lanczos 法进行模态分析,得到满仓下结构前 3 阶自振频率(表 2)和模态振型(图 3)。

表 2 前 3 阶模态分析结果

Table 2 Results of first 3-order modal analysis

模态	周期/s	X 向参与/%	Y 向参与/%	Z 向参与/%
1	1.299	T_x - 55.32	T_y - 7.861	R_z - 0.529
2	1.205	T_x - 7.612	T_y - 48.74	R_z - 0.082
3	1.064	T_x - 0.452	T_y - 0.080	R_z - 53.06

注: T 表示平动; R 表示旋转。

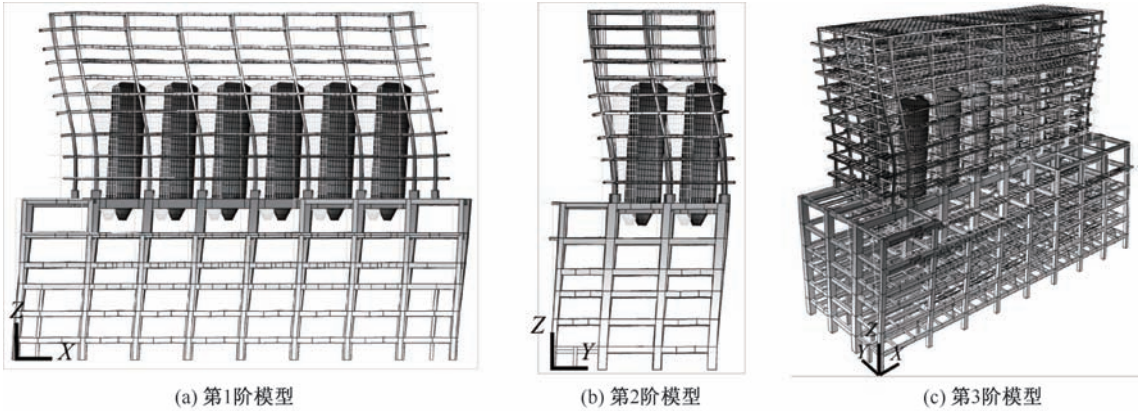


图 3 前 3 阶基本模态振型(原结构)

Fig. 3 First three basic modes of vibration (original structure)

文中模型为 16 层,第 1 阶自振周期为 1.299 s,与文献[17]中框架结构经验公式估算为 0.8~1.6 s,处于合理范围。前 2 阶模态以 X/Y 向平动为主(质量参与系数分别为 55.32%、48.74%),但均伴随显著整体扭转分量(R_x/R_y 向参与系数 7.61%~7.86%),第 3 阶模态则呈现 R_z 向扭转主导(质量参与系数 53.06%)的耦合振动特征。上述现象源于高架筒仓质心-刚心偏距,引发平动扭转耦合效应,基于该特性改造后续基础隔震。

1.4 有限元模型——隔震结构

为改造原有高架筒仓的动力特性,将天然叠层橡

胶支座与铅芯叠层橡胶支座组合使用,并把水平刚度较大的铅芯支座布置在隔震层周边位置,该方案在控制偏心率,降低结构扭转效应中具有良好效果^[18-20]。

采用顶升-隔震层植入技术体系实施隔震层增设,整体现浇 160 mm 厚梁板结构并双层双向配筋。在基础顶面设置临时支撑系统后切割框架柱,原柱主筋通过后植筋延伸至隔震层上下支墩,通过高强螺栓连接隔震装置与上下预埋板,新旧混凝土界面采用环氧树脂灌浆料填充密实。采用 Midas-Gen 软件内置一般连接特性定义支座属性与边界条件来模拟隔震装置(表 3),共布置 34 个隔震支座连接属性。

表 3 隔震支座属性
Table 3 Properties of isolation bearings

支座类型	直径/mm	橡胶厚度/mm	第 1 形状系数	第 2 形状系数	竖向刚度/(kN · m ⁻¹)	初始刚度/(kN · m ⁻¹)	屈服强度/kN	屈服后刚度/(kN · m ⁻¹)	等效刚度/(kN · m ⁻¹)
铅芯叠层橡胶支座	700	163	30	5	3 600 000	19 120	106	1 470	2 120
铅芯叠层橡胶支座	900	220	30	5	4 800 000	26 680	227	2 050	3 080
天然叠层橡胶支座	1 000	220	30	5	4 500 000	2 100	—	—	2 100

改造后的模态分析(表 4)表明:结构前 2 阶振型已呈现平动主导特征,证实隔震层刚度重分布有效消除了高架筒仓质量和刚度偏心导致的平扭耦合效应。

表 4 隔震后模态分析结果

模态	周期/s	X 向参与/%	Y 向参与/%	Z 向参与/%
1	5.998	$T_x-93.97$	$T_y-0.087$	$R_z-1.904$
2	5.931	$T_x-0.093$	$T_y-96.34$	$R_z-0.005$
3	4.913	$T_x-1.814$	$T_y-0.012$	$R_z-93.24$

基于反应谱法的动力分析显示(图 4 和图 5),混凝土框架层间位移角峰值由 1/76 降至 1/610,钢框架顶点侧移降低 82.4%。基底剪力显著衰减,X 向基底剪力由改造前 20 917 kN 降至 7 154 kN,Y 向由 22 090 kN 降至 7 405 kN,验证了隔震装置通过延长结构周期实现地震力削减的机制。

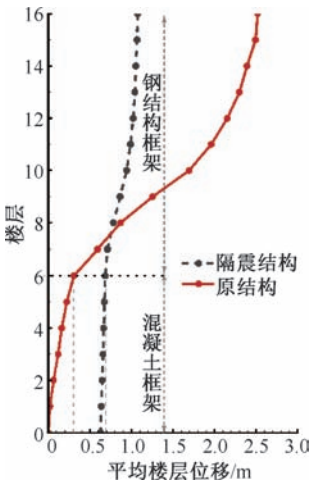


图 4 高架筒仓平均楼层位移

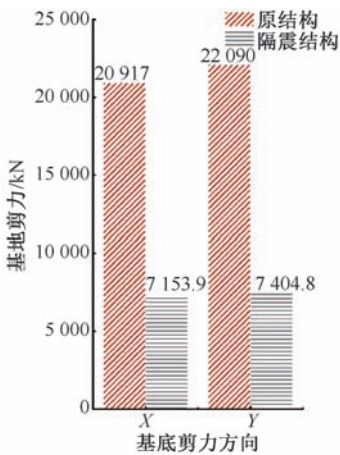


图 5 隔震前后基底剪力

Fig. 5 Base shear comparison before and after base isolation

录,在经过调幅的地震动作用下进行结构弹塑性时程分析,得到一系列结构弹塑性地震响应,产生一条或者多条损伤指标 (Damage Measures, DM) 和地震动强度指标 (Intensity Measures, IM) 之间的关系曲线,按照一定的统计方法评估结构的抗震性能^[21]。选取地面峰值加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 作为地震动强度指标,参考筒仓地震易损性相关研究,选取最大层间位移角作为损伤指标。根据频谱特性、有效峰值、持续时间选取 10 条天然记录地震波进行 IDA 分析,PGA 从 0.1~1.0 g 调幅,共 200 组工况,反应谱对比符合规范要求(图 6)。

2.2 IDA 分析结果

IDA 分析作为一种有效评估结构的地震易损性工具而被广泛应用,以 PGA 为纵坐标,结构主要响应参数(层间位移角、水平位移、基底剪力)为横坐标,绘制 IDA 承载力曲线(图 7),非线性分析反映了结构在低到高强度的地面运动下,由弹性状态到整体倒塌过程。

2 IDA 分析

2.1 选波及调幅

IDA 法是向结构模型输入一组或多组地震动记

Fig. 4 Average floor displacement of elevated silos

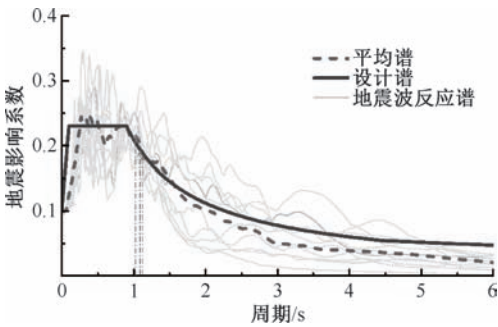


图 6 选取地震波反应谱对比

Fig. 6 Comparison of response spectrum of selected ground motions

IDA 分析结果显示,在 PGA 低于 0.3 g 时 IDA 曲线整体以线性状态为主,高于 0.3 g 后进入到非线性状态,剪力与位移关系曲线表现出明显的非线性行为。通过数值模拟获得的屈服机制体现了框架-高架筒仓结构随地面运动强度发展的损坏过程,支承框架顶层梁柱节点处的高度塑性损伤,以及首层柱脚处率先出现的塑性变形都会引起软弱层倒塌机制。

基础隔震改造后,随着 PGA 增大,IDA 曲线近乎呈线性比例增长。在罕遇地震作用下 ($\text{PGA} = 0.22\text{ g}$),原结构最大层间位移角平均值为 2.3×10^{-2}

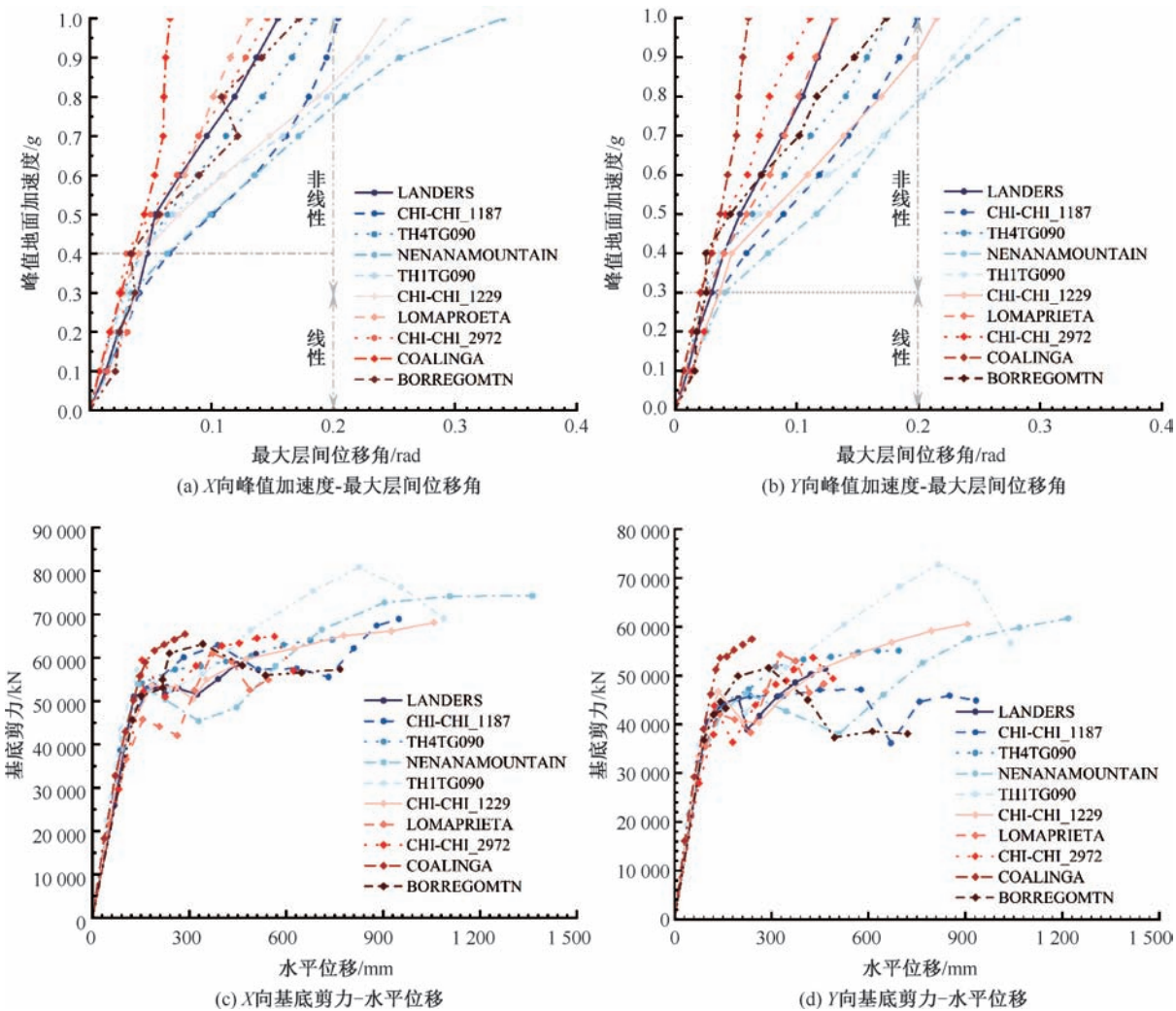


图 7 框架-高架筒仓 IDA 曲线簇

Fig. 7 IDA curves of frame-elevated silos

(X 向)、 $2.0\times 10^{-2}\text{ rad}$ (Y 向),隔震结构则为 0.789×10^{-2} (X 向)、 $0.982\times 10^{-2}\text{ rad}$ (Y 向),通过基础隔震装置降低层间位移角峰值 65.78% (X 向)与 51.07% (Y 向)。较低的楼层位移角值降低了软弱

层倒塌风险(图 8),首层柱脚处塑性损伤明显降低,说明基础隔震装置能有效减少结构的地震易损性(图 9),铅芯橡胶支座在地震作用下充分地发挥了耗能特性^[22]。

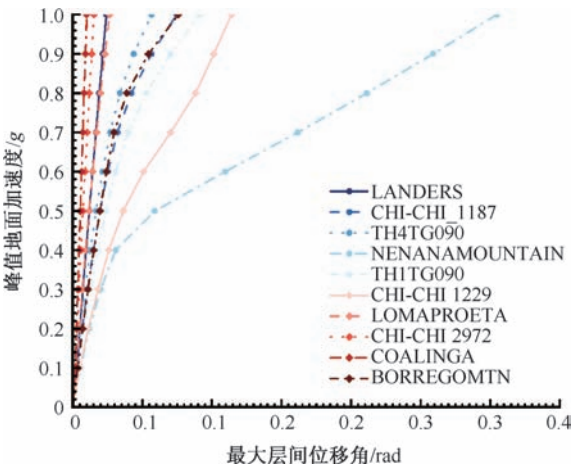


图 8 IDA 曲线簇(隔震改造)

Fig. 8 IDA curves of retrofitted frame-elevated silos

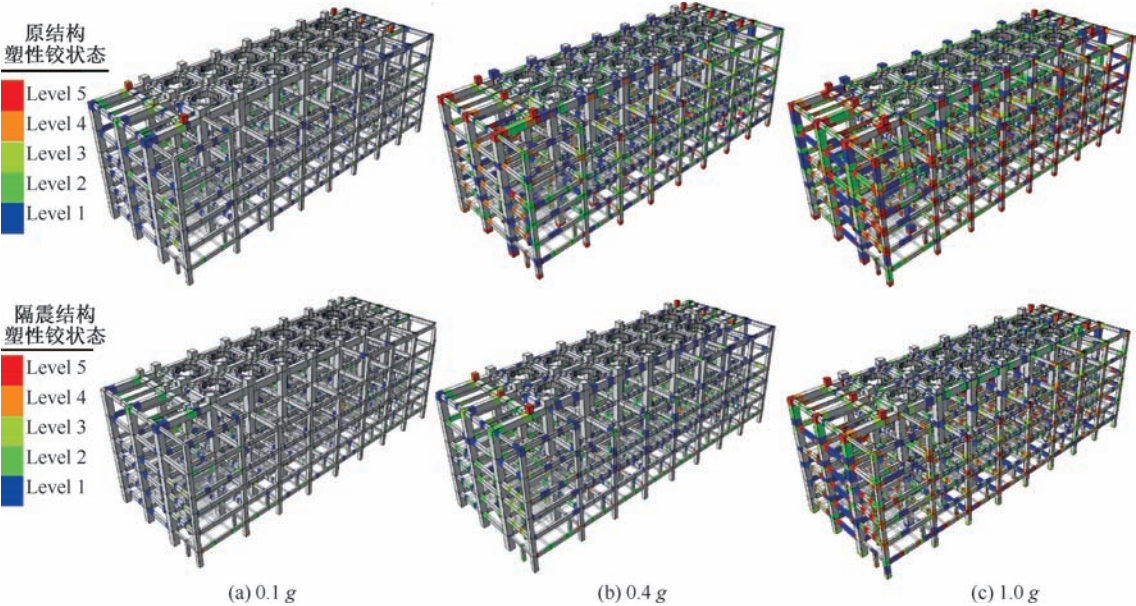


图 9 框架-高架筒仓结构塑性铰状态

Fig. 9 Plastic hinge state of frame-elevated silos

表 5 框架-高架筒仓结构极限状态定义

Table 5 Definitions of limit states for frame-elevated silo structure

极限状态	基本完好	轻微损坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
限值 θ	1/550	1/250	1/130	1/55	1/20

3.2 地震易损性分析

地震易损性是在地震动层面上表示的一种结构抗震能力,大量地震易损性分析研究结果表明:地震易损性曲线可用对数正态概率模型描述。从 IDA 分析结果中按下式计算不同 IM 条件下结构位移超越极限状态的概率,并绘制易损性曲线。

3 框架-高架筒仓地震易损性分析

3.1 性能水准与极限状态定义

在地震易损性分析中,通常将建筑结构在地震作用下的破坏程度分为若干等级,每一个破坏等级的界限状态被称为极限状态^[23]。结合我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中地震破坏分级和变形参考值,以及倒塌状态最大层间位移角控制指标,定义框架-高架筒仓结构的极限状态划分为基本完好—倒塌(表 5),其中,采用各楼层最大层间位移角作为量化指标,与 IDA 分析中损伤指标一致。

$$P(\theta_{\max} \geq \theta_i | IM) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln\theta_i - \mu_{\ln\theta_i | IM}}{\sigma_{\ln\theta_{\max} | IM}}\right) \quad (6)$$

式中: Δ 和 σ 分别为最大层间位移角的对数平均值和对数标准差; Φ 为累积正态标准函数。

从易损性曲线(图 10)可知:框架-高架筒仓结构的易损性曲线较为陡峭,说明结构在地震作用下容易进入损坏状态。在设防地震下发生严重损坏的概率为 38.16%,结构无倒塌风险。在罕遇地震时以严重破坏为主,发生倒塌的概率为 3.63%,低于美国联邦应急管理局 P-695 指南中要求的平均倒塌概率 10%。经隔震改造后,易损性曲线整体变得平缓,结构抵御地震风险的能力明显提高。在多遇地震下有 48.34% 的概率超越弹性状态,10.75% 的概

率进入到轻微损伤状态。在设防地震下,发生中等损伤的

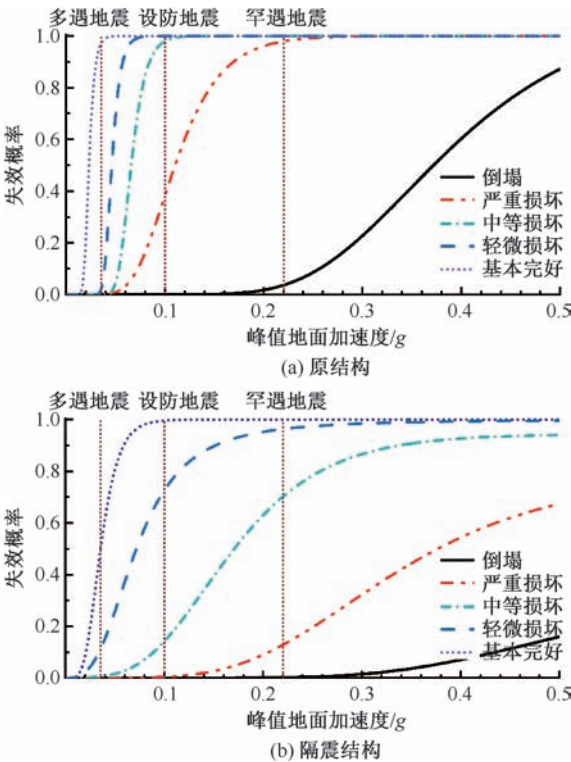


图 10 框架-高架筒仓易损性曲线

Fig. 10 Vulnerability curves of frame-elevated silos

概率为 14.13%,且几乎不会进入严重损坏状态,相较于改造前抗震能力大幅度提高。在罕遇地震下,发生倒塌的概率仅为 0.173%,相较于改造前抗倒塌风险提高了近 20 倍。当峰值强度超过罕遇地震后,原结构发生倒塌的风险将迅速增大,PGA 等于 0.5 g 时倒塌概率达 87.19%,而隔震改造后倒塌概率为 15.95%,说明基础隔震装置对框架-高架筒仓结构在小概率地震事件时抗倒塌性能更好。

4 结 论

- 1) 基础隔震装置在罕遇地震下,通过减小层间位移角峰值(X 向降低 65.8%、 Y 向降低 51.07%)、减弱支承框架顶层处梁柱节点的塑性损伤以及延缓首层柱脚处塑性铰发展来消除软弱层倒塌机制。
- 2) 采用基础隔震装置后,框架-高架筒仓结构在抵御不同水平地震事件时均展现出良好的抗震性能,在罕遇地震下,倒塌概率由 3.63% 降低至 0.173%,进入损伤状态的风险明显降低,特别是小概率地震时抗倒塌性能显著提升。
- 3) 对已建的高架筒仓结构进行基础隔震改造在施工上有一定困难,仍需要研究出方便改造的层间隔震装置,降低已有工业设备的地震脆弱性。

参 考 文 献

[1] KHALIL M, RUGGIERI S, UVA G. Assessment of structural behavior, vulnerability, and risk of industrial silos: state-of-the-art and recent research trends[J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): DOI: 10.3390/app12063006.

[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] MARIUS P, BENNO H, MARKUS F. Performance assessment of seismic retrofitting measures on silo structures using innovative seismic protection systems[C]. Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 2016: 5 851-5 867.

[4] UCKAN E, AKBAS B, SHEN J, et al. Seismic performance of elevated steel silos during Van earthquake, October 23, 2011[J]. Natural Hazards, 2015, 75: 265-287.

[5] KANYILMAZ A, CASTIGLIONI A C. Reducing the seismic vulnerability of existing elevated silos by means of base isolation devices[J]. Engineering Structures, 2017, 143: 477-497.

[6] PHAN H N, PAOLACCI F, CORRITORE D, et al. Seismic vulnerability mitigation of liquefied gas tanks using concave sliding bearings[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14: 3 283-3 299.

[7] PAOLACCI F. On the effectiveness of two isolation systems for the seismic protection of elevated tanks[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2015, 137(3): DOI: 10.1115/PVP2014-28563.

[8] GIANNINI R, PAOLACCI F, ANGELIS D M, et al. Shaking table tests upon a base isolated steel liquid storage tank[C]. 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008: 12-17.

[9] CASTIGLIONI C A, KANYILMAZ A, BELLOS J. Simplified numerical modeling of elevated silos for nonlinear dynamic analysis[J]. Ingegneria Sismica, 2016, 33(1/2): 5-15.

[10] 许启铿,李建业,刘涛,等. 基于 IDA 方法的柱承式筒仓结构地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(3): 640-648.

XU Qikeng, LI Jianye, LIU Tao, et al. IDA-based fragility assessment of column-supported silo[J]. Journal of Disaster

- Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 640–648.
- [11] 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 Lumin, ZHANG Hua, LU Wensheng, et al. Study of shaking table tests on the model of group silos structures[J]. Building Structure, 2010, 40(10): 41–43.
- [12] 李葱葱, 马东辉, 王志涛. 基于 IDA 的群体典型框架结构的震害预测研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 127–132.
LI Congcong, MA Donghui, WANG Zhitao. Earthquake damage prediction of group typical frame structures based on IDA method[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(4): 127–132.
- [13] 段红杰, 周文玉, 蒋玮. 大直径筒仓结构的有限元分析[J]. 工业建筑, 2000, 30(9): 30–32.
DUAN Hongjie, ZHOU Wenyu, JIANG Wei. Finite element analysis of large diameter concrete silos[J]. Industrial Construction, 2000, 30(9): 30–32.
- [14] 张强, 周德源, 邹翊, 等. 基于纤维模型 RC 框架结构非线性全过程分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(3): 6–9.
ZHANG Qiang, ZHOU Deyuan, ZOU Xuan, et al. Full-range nonlinear analysis based on fiber model of RC frame structures[J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(3): 6–9.
- [15] 张帅枫. 不同工况下钢板仓模型地震响应机理研究[D]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2023.
ZHANG Shuaifeng. Study on seismic response mechanism of steel silo model under different working conditions[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Aeronautics, 2023.
- [16] GB 50077—2017, 钢筋混凝土筒仓设计标准[S].
GB50077–2017, Standard for design of reinforced concrete silos[S].
- [17] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
GB50009–2012, Load code for the design of building structures[S].
- [18] 王威, 黄小宁, 王宁, 等. 基于隔震技术的偏心结构扭转控制研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(1): 83–89.
WANG Wei, HUANG Xiaoning, WANG Ning, et al. Research on torsion control of eccentric structure based on isolation technology[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(1): 83–89.
- [19] 蔡粮锴, 柏文, 戴君武, 等. 基础隔震结构隔震层扭转控制及影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 200–209.
CAI Liangkai, BAI Wen, DAI Junwu, et al. Research on torsional control and influence of isolation layer of base isolation structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 200–209.
- [20] 马丽, 于剑桥, 邹爱华. 西部高烈度地区某小学综合楼隔震设计及性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(3): 109–115.
MA Li, YU Jianqiao, ZOU Aihua. Seismic design and performance study of the comprehensive building of a primary school in high intensity areas of Western China[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(3): 109–115.
- [21] 庞倩文, 翟永梅, 胡苇. 基于增量动力分析的建筑震害预测研究[J]. 防灾减灾学报, 2023, 39(4): 77–82.
PANG Qianwen, ZHAI Yongmei, HU Wei. Research on building seismic damage prediction based on incremental dynamic analysis[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2023, 39(4): 77–82.
- [22] 王彬, 丁海平. 地基-基础隔震系统整体地震响应有限元分析[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(8): 12–16, 114.
WANG Bin, DING Haiping. Finite element analysis of whole seismic response of the foundation base isolated structure[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(8): 12–16, 114.
- [23] 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 Xilin, SU Ningfen, ZHOU Ying. IDA-based seismic fragility analysis of a complex high-rise structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(5): 19–25.

作者简介: 罗勇哲 (1979—), 男, 黑龙江五常人, 本科, 高级工程师, 主要从事油气田工程结构设计等方面的工作。E-mail: luoyongzhe-hqc@cnpc.com.cn。

