

冷库大跨度预应力无梁楼盖竖向地震作用下动力响应研究

王嘉琪^{1,2}, 彭有开^{1,2}, 于连奎³, 李正⁴

(1. 北京建筑大学 工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心, 北京 100044;

2. 北京建筑大学 大型多功能振动台阵实验室, 北京 102616;

3. 华商国际工程有限公司, 北京 100069; 4. 防灾科技学院 土木工程学院, 河北 三河 065201)

摘要: 为研究冷库板柱-抗震墙结构大跨度预应力无梁楼盖在竖向地震作用下动力响应规律, 以上海某冷库工程简化模型为分析对象, 首先采用 YJK 软件进行结构设计, 之后采用 ABAQUS 软件进行静力加载与动力时程分析, 考虑多遇地震三向输入、罕遇地震水平双向输入、罕遇地震竖向输入、罕遇地震三向输入地震波等工况, 分析结构塑性损伤、各楼层竖向加速度分布、各层柱子轴力、板柱节点冲切力、竖向地震作用等, 总结竖向地震影响系数与动力系数的规律。结果表明, 竖向地震增加了板柱节点的破坏程度; 竖向地震作用下大跨度预应力无梁楼盖各点竖向加速度并非均匀; 三向罕遇地震工况下柱轴力与板柱节点冲切力增加显著; 竖向罕遇地震工况下结构地震影响系数最大值为 0.556, 动力系数沿高度变化规律与地震波频谱特性有关, 最大值达 3.89。设计中可根据分析结果采取差异化增强重点部位承载力与抗震性能的措施。

关键词: 冷库; 大跨度; 预应力无梁楼盖; 竖向地震作用; 动力响应

中图分类号: TU375.2; TU378.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1144(2024)03-0158-09

Dynamic Responses of Large-span Prestressed Beamless Floor of Cold Store Under Vertical Earthquake Action

WANG Jiaqi^{1,2}, PENG Youkai^{1,2}, YU Liankui³, LI Zheng⁴

(1. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Civil Engineering Structure and Renewable Material, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 100044, China;

2. Multi-Functional Shaking Tables Laboratory, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 102616, China;

3. Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100069, China;

4. School of Civil Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201, China)

Abstract: To analyze the dynamic response of large-span prestressed beamless floor of slab-column-wall structure under vertical earthquake, a simplified model of three-story cold store in area with earthquake intensity of seven was taken as an example. Firstly, structural design was conducted using YJK software, and the static loading and dynamic time history were then analyzed by ABAQUS software. The dynamic loading condition includes three-way ground motion of small earthquake, horizontal bidirectional ground motion of strong earthquake, vertical ground motion of strong earthquake, as well as three-way ground motion of strong earthquake. The structural plastic damage, vertical acceleration distribution of each floor, column axial force of each floor, punching force of slab-column connections and vertical earthquake action were analyzed, and the rules of vertical earthquake influence coefficient and dynamic coefficient were summarized. The results are as follows. Vertical earthquake can increase the damage degree of slab-column connec-

tions. The vertical acceleration of large-span prestressed beamless floor at each point under vertical earthquake is not uniform. The column axial force and punching force of slab-column connections increase significantly under three-way strong earthquake loading condition. The maximum value of seismic influence coefficient of structure under vertical strong earthquake conditions is 0.556. The rule of dynamic coefficient varying with height is related to the characteristics of seismic wave spectrum, and the maximum value of 3.89 was obtained. It is suggested that measures should be taken to enhance the bearing capacity and seismic performance of key structure component according to the analysis results in practical engineering design.

Keywords: cold store; large-span; prestressed beamless floor; vertical earthquake action; dynamic response

为最大化冷库库容、实现均匀制冷等,我国多高层冷库较多采用板柱-抗震墙结构。现代冷库为提高机械化作业水平、降低制冷能耗,要求内部具有更大有效空间、大柱距,国内创新采用大跨度预应力无梁楼盖技术并在工程中进行了应用^[1-3]。

在板柱-抗震墙结构设计中,水平地震作用主要由抗震墙承担,无梁楼板与框架柱以承受竖向荷载为主。板柱节点易发生冲切破坏^[4],节点抗冲切设计是极为关键的设计内容,可采取配置抗冲切钢筋、提高板底纵筋强度和配筋率、设置托板柱帽^[5],以及设置暗梁^[6]等措施。由于冷库荷载大,柱距由传统6 m~9 m增大到12 m左右,使得这一问题更为突出。我国规范^[7]考虑了竖向荷载、水平地震作用引起的冲切,对于竖向地震作用引起的冲切未进行考虑。当竖向加速度较大时,可能会使得节点冲切力超出设计值,导致节点破坏或竖向连续性倒塌。目前,我国建筑抗震设计规范^[8]规定对于9度时的高层建筑计算竖向地震作用,冷库设计标准^[9]对于冷库结构竖向地震作用计算尚无相应规定。

地震动竖向加速度峰值与水平加速度峰值之比与震源矩相关^[10],竖向反应谱与水平反应谱的比值与周期、震源矩、场地条件有关^[11]。根据我国汶川地震强震记录,约30%台站的竖向与水平加速度峰值比大于0.65^[12]。李宁等^[13]提出近断层区域不同矩震级、断层矩、场地类型下的加速度峰值比的合理取值。研究表明,竖向地震对不同结构类型的影响不尽相同。易伟建等^[14]对竖向和水平地震动共同作用下8层钢筋混凝土框架结构分析表明,竖向地震使框架柱的轴力发生剧烈变化,原来压弯受力状态可能变为拉弯受力状态。陈才华等^[15]总结了我国12个框架-核心筒结构及筒体结构超高层建筑振动台试验,结果表明竖向加速度放大系数总体上呈现沿高度逐渐增大的规律。高华国等^[16]开展了15层住宅抗震墙结构振动台试验,结构竖向加速度放大系数则为沿高度先增大后减小,8层为2.0~

3.5,约为15层的2倍。目前,对于冷库大跨度板柱-抗震墙结构研究尚少,缺乏竖向地震作用下其动力响应规律的研究。

本文以7度区某3层冷库大跨度板柱-抗震墙结构简化模型为研究对象,首先采用YJK软件进行设计计算,之后采用ABAQUS软件进行恒载与活载作用工况的静力加载分析与地震作用下的动力时程分析,考虑7度多遇地震三向输入、罕遇地震水平双向输入、罕遇地震竖向输入、罕遇地震三向输入地震波等工况,分析结构塑性损伤、各楼层竖向加速度分布特征、各层柱子轴力、板柱节点冲切力、竖向地震作用等,总结竖向地震影响系数与动力系数的规律,可为规范修订与工程设计提供参考。

1 工程概况

选取某3层大跨度预应力板柱-抗震墙冷库简化模型进行分析。抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度为0.1g,设计地震分组第一组,场地类别Ⅳ类,地面粗糙度为C类。1、2层楼面活荷载标准值为30 kN/m²,屋面活荷载标准值为2 kN/m²。

1~3层层高分别为6.3 m、7.8 m、7.7 m。标准层平面如图1所示,内部为板柱,四角布置剪力墙,周边中间跨为框架梁。各跨跨度12.1 m,1层梁截面600 mm×1 000 mm,2、3层梁截面400 mm×1 000 mm。1层、2层楼板厚度为450 mm,屋顶板厚300 mm。1层柱截面1 400 mm×1 400 mm,2~3层1 200 mm×1 200 mm,剪力墙通高布置,墙厚为400 mm。梁、板混凝土采用C40,柱、墙采用C45,钢筋采用HRB400。

采用YJK软件进行弹性分析与配筋设计,根据冷库设计标准^[9],活荷载组合系数取0.8。第一阶、二阶振型为平动,周期为0.2173 s,第三阶为扭转,周期为0.1387 s,第四阶振型为竖向振动,周期为0.1057 s。多遇地震作用下水平最大层间位移角为1/9999,抗震墙承担全部水平地震作用,满足抗震设

计要求。梁、柱、墙配筋采用 YJK 配筋结果。采用倾角联托板柱帽形式抗冲切方案,托板 6 000 mm × 6 000 mm,厚 600 mm,柱帽 3 000 mm × 3 000 mm,高 600 mm,如图 2 所示。托板配置双向 C10@150 钢筋及 C10@100 箍筋,柱帽配置 4C22 斜竖向钢筋及 C10@100 箍筋。无梁楼板采用平衡荷载法计算预应力筋,平衡荷载 = (恒荷载标准值 + 活荷载标准值) × 50%,恒荷载标准值 1 层、2 层取 15 kN/m²,屋顶取 12 kN/m²,选取预应力筋基本线型 C4^[17],平均预压应力为 2.6 N/mm²,在 1.0 N/mm² ~ 3.5 N/mm² 之间,满足规程要求^[18]。

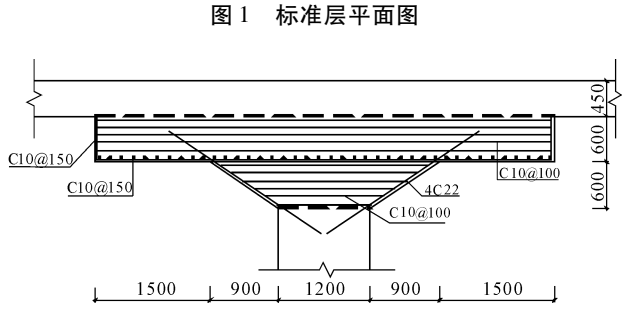
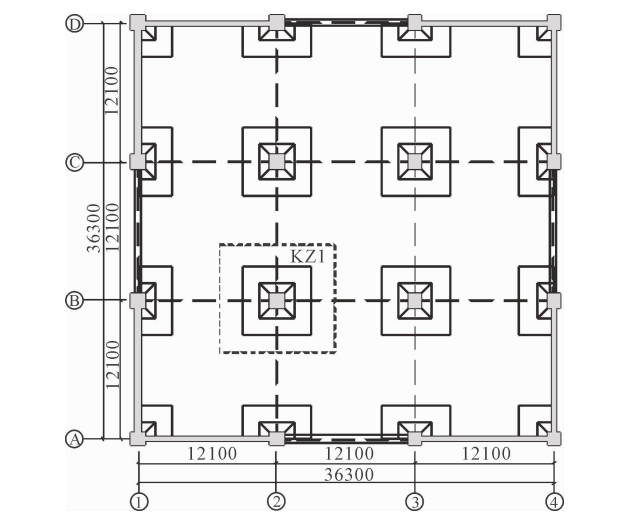


图 1 标准层平面图

2 ABAQUS 软件建模

选用 ABAQUS 有限元分析软件建立结构整体模型,如图 3 所示。为建模方便,统一采用一种托板与柱帽形式,并将预应力筋通过等效荷载法进行简化,将平均预压应力 2.6 MPa 以应力形式施加到楼板的四周。梁、柱采用铁木辛柯梁单元 B31,抗震墙采用四节点曲面减缩积分壳单元 S4R,并通过分层壳^[19]进行建立,楼板、柱帽、托板采用八节点六面体线性减缩积分实体单元 C3D8R。楼板、柱帽及托板混凝土本构采用过镇海模型^[20]。梁、柱及钢筋的本

构采用清华大学基于 ABAQUS 开发的一组材料单轴滞回本构模型的集合 PQ-Fiber,其中梁、柱混凝土本构选用拉压混凝土模型^[21]。钢筋选用考虑承载力退化的 Clough 模型^[22-24]。C40 混凝土塑性损伤模型相应参数见表 1,根据 ABAQUS 建模经验及收敛性试算确定的 CDP 模型其它塑性参数见表 2。

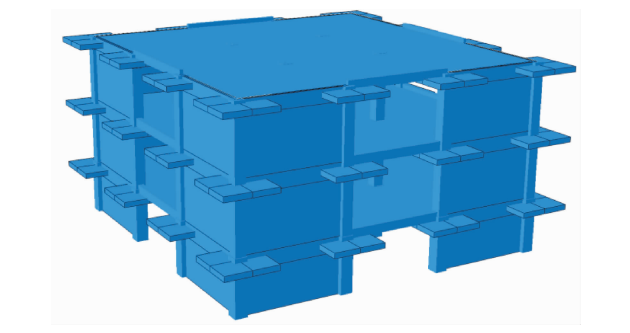


图 3 结构整体模型

表 1 C40 混凝土塑性损伤模型参数

压应力 σ_c /MPa	非弹性 应变 ε_c^{in} / $\times 10^{-3}$	受压损 伤因子 d_c	拉应力 σ_t /MPa	开裂 应变 ε_t^{ck} / $\times 10^{-3}$	受拉损 伤因子 d_t
24.557	0.000	0.000	0.962	0.000	0.000
26.800	1.175	0.358	2.162	0.533	0.667
24.253	2.054	0.484	1.210	0.963	0.807
20.200	2.978	0.584	0.827	1.375	0.865
12.988	5.200	0.733	0.637	1.780	0.896
7.849	8.558	0.834	0.525	2.184	0.914
5.550	11.829	0.881	0.451	2.586	0.927
4.276	15.068	0.907	0.397	2.988	0.936
3.473	18.293	0.924	0.070	6.998	0.982
3.317	19.098	0.927	0.054	7.998	0.986
3.174	19.902	0.930	0.043	8.999	0.988

表 2 CDP 模型其它参数

参数	$\psi/(^{\circ})$	ε	f_{l0}/f_{c0}	K	μ	E_0/MPa	ν
取值	30	0.1	1.16	0.667	0.0005	32500	0.2

注: ψ 为膨胀角; ε 为流动偏心参数; f_{l0}/f_{c0} 为双轴受压与单轴受压强度比; K 为拉压子午线第二应力不变量之比; μ 为粘性系数; E_0 为混凝土弹性模量; ν 为泊松比。

3 地震波选取

我国建筑抗震设计规范^[8]规定,采用时程分析法时,应选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线,实际强震记录的数量不应少于总数的 2/3,

多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符,即在对应于结构主要振型的周期点上相差不大于 20%。

本文通过 PBS^[25] 软件基于水平地震反应谱选取了两组天然波 MYZ009415000 (MY)、RSN1041LGBHN (RS) 和一组人工波 AR302140 (AR),反应谱对比见图 4、图 5。

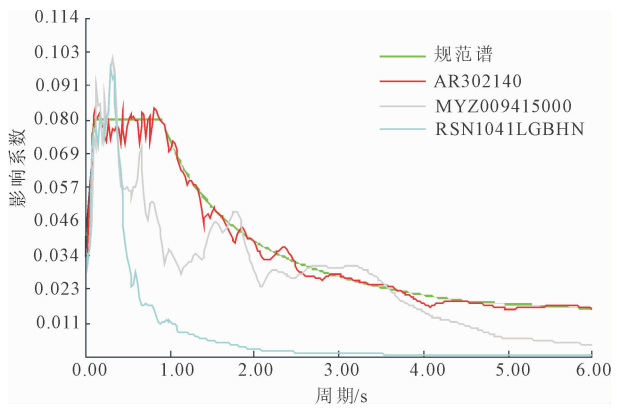


图 4 多波反应谱与规范反应谱的对比

每组地震波均包含水平主方向、水平次方向、竖向分量共三条时程曲线,见图 6。将三组地震波的峰值加速度进行调幅,多遇地震峰值加速度为 35 cm/s²、设防地震峰值加速度为 100 cm/s²、罕遇地震峰值加速度为 220 cm/s²。只进行竖向输入时,采用竖向分量时程曲线。水平主、次方向同时输入时,水平主方向、次方向峰值加速度比值为 1:0.85。进行三向输入时,水平主方向、次方向及竖向分量峰值加速度比值为 1:0.85:0.65。

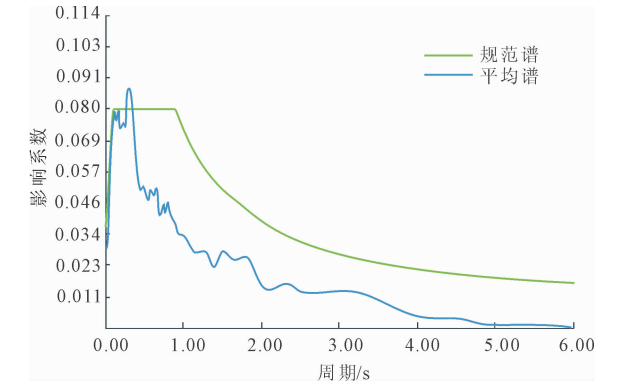
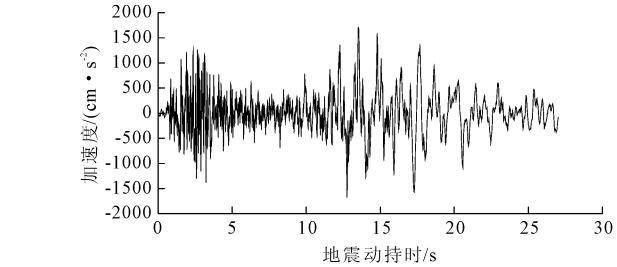
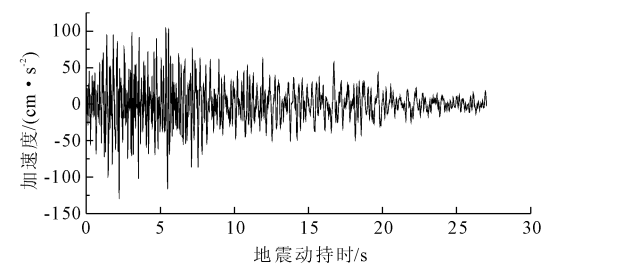


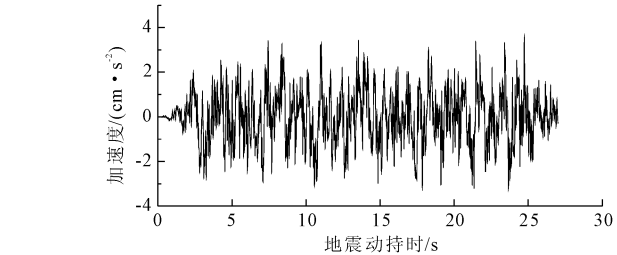
图 5 平均反应谱与规范反应谱的对比



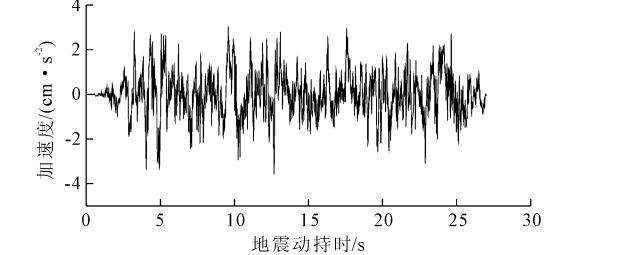
(a) MYZ009415000 竖向分量时程曲线



(b) RSN1041LGBHN 竖向分量时程曲线



(c) AR302140 人工波水平主方向时程曲线



(d) AR302140 人工波水平次方向时程曲线



(e) AR302140 人工波竖向分量时程曲线

图 6 地震波时程曲线

分析工况:(1) 1.0 恒载标准值 +0.8 活载标准值(1.0 恒 +0.8 活)作用静力加载;(2) 1.3 恒载标准值 +1.5 活载标准值(1.3 恒 +1.5 活)作用静力加载;(3) 多遇地震、设防地震、罕遇地震下竖向地震工况;(4) 罕遇地震下人工波双向水平地震工况;(5) 多遇地震、罕遇地震下人工波三向地震工况。其中,在地震工况下,0.8 倍活载标准值以惯性质量的方式施加,按楼板体积组成比分布于各楼层及屋顶。

4 结果分析

4.1 结构塑性损伤云图

塑性受拉损伤(DAMAGET)是反映结构塑性损伤的指标之一,取值范围为0~1,0代表混凝土没有

发生损伤,1代表混凝土完全破坏。图7为人工波作用下结构塑性受拉损伤云图。多遇地震三向输入工况下,结构未出现明显损伤;罕遇地震竖向输入工况下,板柱节点处有轻微损伤。罕遇地震水平双向输入工况下,抗震墙底部出现大面积损伤,板柱节点处则无明显损伤,与抗震墙承担全部水平地震作用、板柱承担竖向荷载的设计相符。罕遇地震三向输入工况下,板柱节点处产生冲切环形状的破坏,与竖向、水平双向输入工况相比损伤程度更为显著。

4.2 竖向加速度分布及位移云图

图8、图9为人工波竖向输入罕遇地震工况下两个时刻($t=14.42\text{ s}$ 、 19.68 s)的各层竖向加速度分布图。

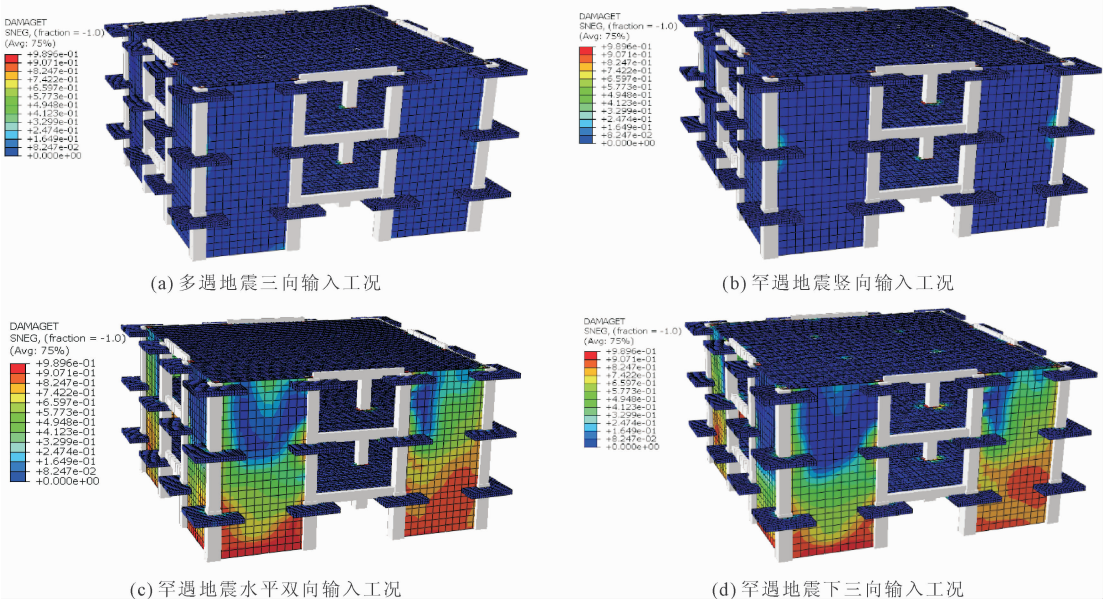


图7 人工波作用下结构塑性损伤云图

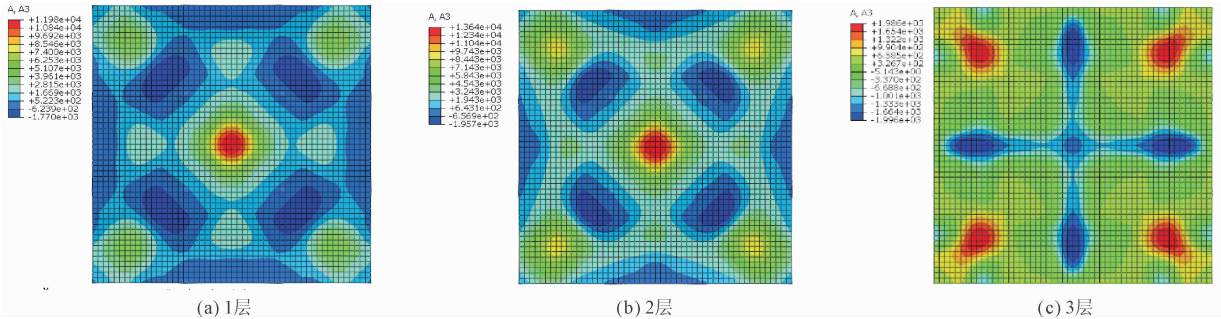


图8 各层竖向加速度分布($t=14.42\text{ s}$ 时刻)

由图8可知,1、2层墙柱加速度为负值,运动趋势向上,楼板大部分区域加速度为正值,运动趋势向下,处于超重状态,1层中心位置竖向加速度为 11.98 m/s^2 ($1.222g$),2层中心最大,达到 13.64

m/s^2 ($1.392g$)。三层则与之相反,中间跨楼板中心运动趋势向上,处于失重状态,中心点加速度为负值 1.996 m/s^2 ($0.204g$)。图9所示时刻3层楼板处于超重状态,中心点最大加速度为 12.14 m/s^2

(1.239g)。

图 10、图 11 为两个时刻的位移云图。 $t = 14.42$ s 时刻整体结构底部竖向位移为 390.04 mm, $t = 19.68$ s 时刻整体结构底部竖向位移为 517.99 mm,

图中所示位移值与整体结构底部位移之差为各点相对位移,如 $t = 14.42$ s 时刻,2 层竖向最大向下位移为 67.86 mm,竖向最大向上位移为 2.14 mm。总体上看,楼板向上反拱产生的变形较小。

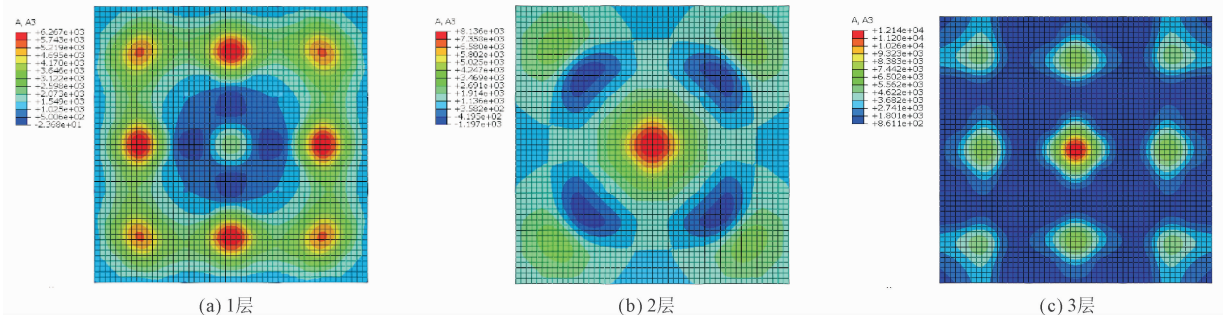


图 9 各层竖向加速度分布($t = 19.68$ s 时刻)

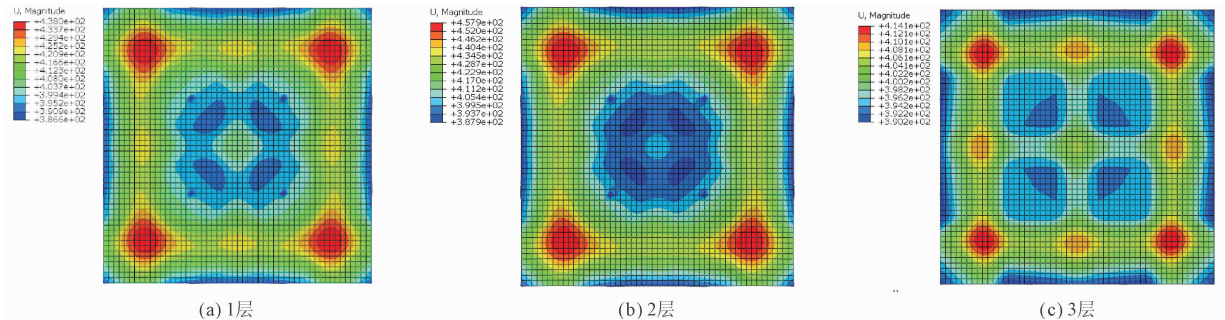


图 10 各层位移云图($t = 14.42$ s 时刻)

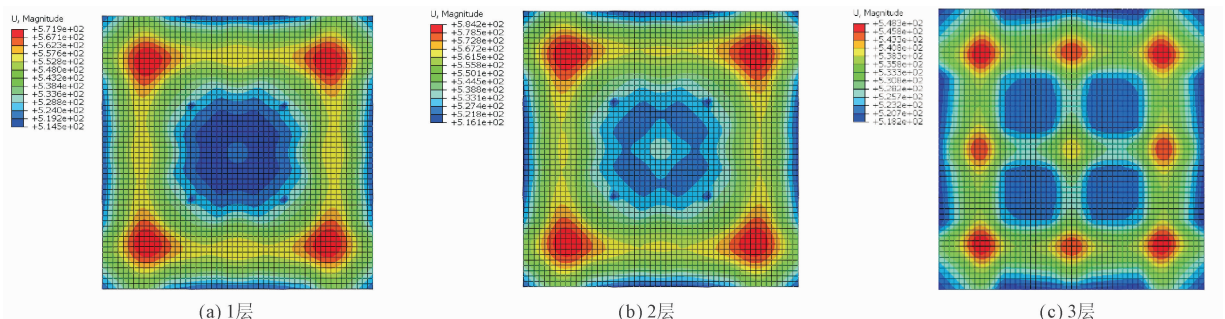


图 11 各层位移云图($t = 19.68$ s 时刻)

4.3 柱轴力

以图 1 中所示柱 KZ1 为例。图 12 为人工波各工况下 KZ1 的最大轴力包络,由图 12 可知,与静力加载工况 1.0 恒 + 0.8 活相比,地震工况均使得 KZ1 的轴力增大,三向多遇地震工况 1~3 层最大增加依次为 8.8%、11%、11.6%,水平双向罕遇地震工况最大增加依次为 32.2%、35.8%、33.3%,竖向罕遇地震工况最大增加依次为 36.3%、44.1%、27.9%,三向罕遇地震工况对轴力的影响最大,1~3 层最大增加依次为 49.1%、63.7%、49.7%。与静

力加载工况 1.3 恒 + 1.5 活比较,三向罕遇地震工况下 2、3 层轴力包络值与之相近,1 层轴力包络值小于工况 1.3 恒 + 1.5 活约 10%。

图 13 对比不同地震波罕遇地震工况与静力加载工况下 KZ1 轴力。由图 13 可知,不同地震波作用下 1、2 层柱轴力有一定差异,但对 3 层柱轴力的影响差别不明显。本文考虑的竖向罕遇地震地面竖向运动峰值加速度为 143 cm/s^2 ($0.146g$),由图 13 可看出,仅考虑竖向地震作用时,各层柱轴力小于静力加载工况 1.3 恒 + 1.5 活的结果。

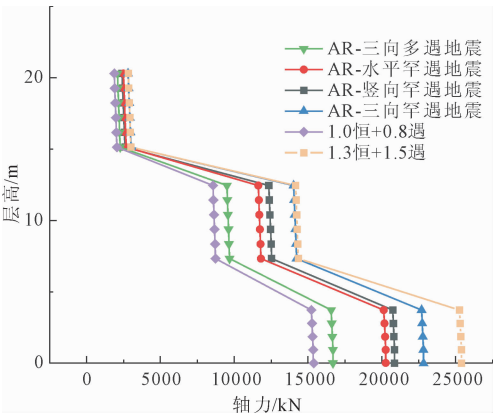


图 12 人工波各工况下 KZ1 轴力包络图

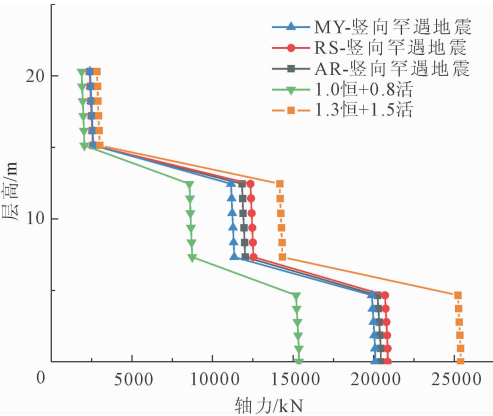


图 13 竖向罕遇地震工况 KZ1 轴力包络图

4.4 板柱节点冲切力

板柱节点冲切力由柱轴力的层间差值减去所计算位置冲切锥范围内作用的竖向荷载计算而得。经验算,托板为最不利冲切位置,如图 14 为不同工况下柱 KZ1 各层托板冲切力。由图 14 可知,与静力加载工况 1.0 恒 + 0.8 活相比,三向多遇地震工况 1~3 层依次增加 8%、14%、16%,水平双向罕遇地震工况依次增加 44%、58%、46%,竖向罕遇地震工况 1~3 层最大增加依次为 41%、65%、39%,三向罕遇地震工况 1~3 层增加依次为 49%、95%、69%。由此表明,地震工况均使得冲切力增大,但在不同地震烈度下各层增加的幅度不同,其中三向罕遇地震工况增幅最大。

前节分析结果表明,三向罕遇地震工况下 2、3 层柱轴力最大包络与静力加载工况 1.3 恒 + 1.5 活相近,1 层则较小,但由于地震作用为动力作用,对于各个楼层的动力影响不同,而且竖向地震下楼板与柱之间存在运动状态相反的情况,对于板柱节点冲切更为不利。如图 14 所示,三向罕遇地震工况下的板柱节点冲切力与静力加载工况 1.3 恒 + 1.5 活

之比值 1~3 层依次为 0.88、1.13、1.17,可见 2 层、3 层板柱节点冲切力超过了工况 1.3 恒 + 1.5 活计算的量值。为了实现在罕遇地震下的安全性要求,建议设计中可根据分析结果采取差异化增强重点部位板柱节点抗冲切承载力的措施。

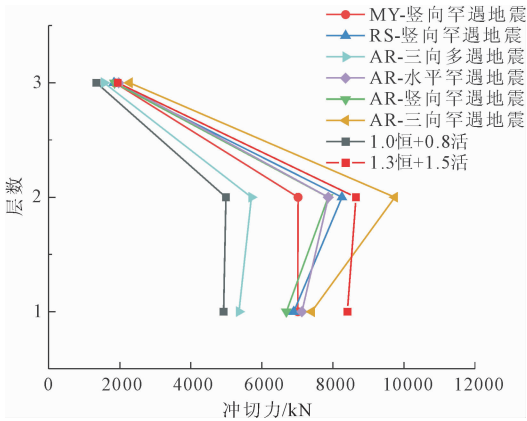


图 14 不同工况下 KZ1 各层托板冲切力

4.5 地震作用计算

4.2 节分析结果表明,竖向地震作用下大跨度预应力无梁楼盖各点竖向加速度并非均匀。由于板柱-抗震墙结构中柱子主要承受竖向荷载,本文以柱子相邻跨中心线围合的区域作为柱子承受竖向荷载的从属面积。以 KZ1 为例,其竖向荷载从属面积见图 1 中的虚线框范围,剖面如图 15(a)所示。简化质点模型见图 15(b),各层质点等效重力荷载标准值 $G_i = (1.0 \text{ 恒载标准值} + 0.8 \text{ 活载标准值}) \times \text{荷载从属面积}$ 。为计算竖向地震工况下某时刻质点 G_i 的竖向地震作用 F_i ,将此时刻的柱轴力与 1.0 恒 + 0.8 活荷载工况下轴力对应相减得到由地震作用产生的柱轴力,再据此计算 i 楼层高度位置处上下层轴力差即为 F_i 。

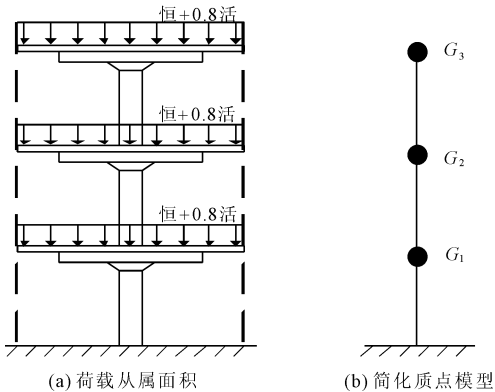


图 15 KZ1 承受竖向荷载的从属面积及简化模型

如图 16 为不同地震波竖向罕遇地震下 KZ1 承

受的各层地震作用,图 16 中分别示出根据不同层柱轴力达到最大值的两个时刻计算出的地震作用。可知,多数情况下柱达到最大轴力时刻各质点的地震作用为向下的正值,但在 RS 地震波作用下二层与三层地震作用达到最大值时刻($t=7.42\text{ s}$),质点 G_1 地震作用为负值。

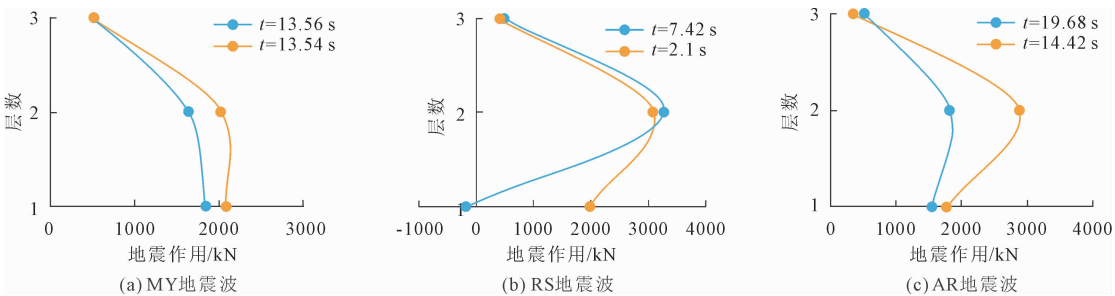


图 16 不同地震波竖向罕遇地震下 KZ1 承受的各层地震作用

4.6 地震影响系数与动力系数

地震影响系数 α 反映地震作用与质点等效重力荷载的相对大小,各质点地震影响系数 $\alpha_i = F_i/G_i$ 。如图 17 为不同地震波竖向罕遇地震下 KZ1 的地震影响系数。MY 地震波加载工况的地震影响系数最大值为 0.356,AR 地震波加载工况最大值为 0.491,RS 地震波加载工况最大值则达到了 0.556。

动力系数 β 反映结构对地面运动加速度的放大倍数,各质点动力系数 $\beta_i = \alpha_i g/a_{\max}$,其中 $a_{\max}$ 地面运动峰值加速度。如图 18 所示为不同地震波竖向

罕遇地震下 KZ1 动力系数。可知,动力系数在不同时刻沿高度分布呈现不同的变化规律。由于不同地震波的频谱特性不同,动力系数变化规律存在差异。RS、AR 地震波加载工况呈现沿高度增加先增大后减小的规律, β 最大值分别为 3.89、3.43,MY 地震波加载工况则随高度增加而减小, β 值为 1.69 ~ 2.49。1~3 层 β 最大值依次为 2.49、3.89、1.66,最大值平均为 2.68。总体上看,中间楼层的动力系数较大,上部与底部楼层的动力系数相对较小。

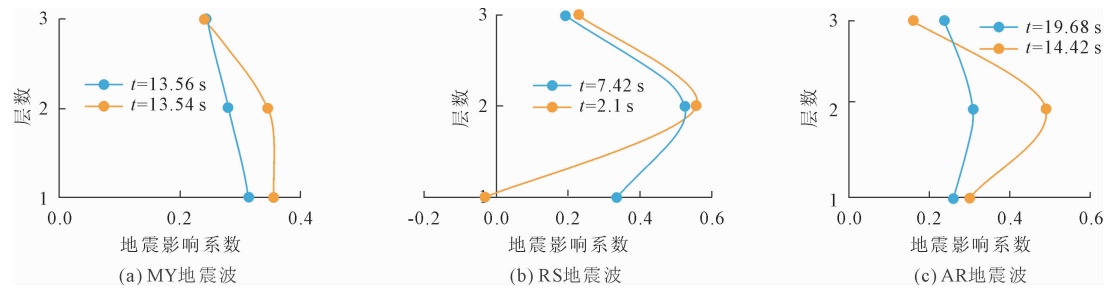


图 17 不同地震波竖向罕遇地震下 KZ1 地震影响系数

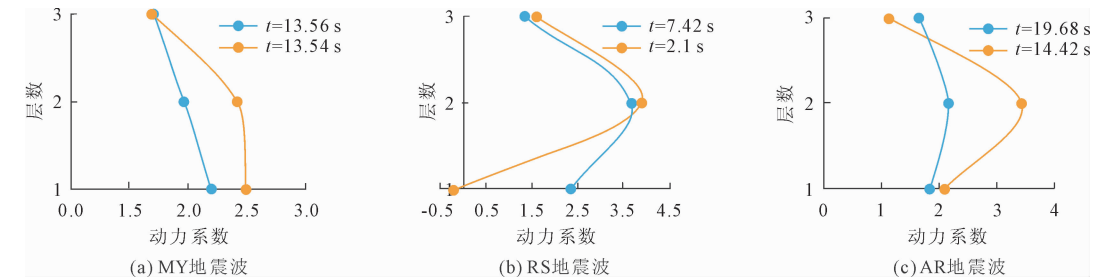


图 18 不同地震波竖向罕遇地震下 KZ1 动力系数

5 结 论

- (1) 竖向地震增加了板柱节点的破坏程度,罕遇地震三向输入工况下,板柱节点处产生冲切环形
- 状的破坏,与竖向、水平双向输入工况相比损伤程度更为显著。
- (2) 竖向地震作用下大跨度预应力无梁楼盖各点竖向加速度并非均匀,在地震过程中,各楼层处于

超重、失重交替变化的状态,总体上大跨度预应力楼板主要发生向下的变形,向上反拱的变形较小。

(3) 与静力加载工况 1.0 恒 + 0.8 活相比,地震工况下柱轴力与板柱节点冲切力增加显著,柱轴力在 7 度三向多遇地震下最大增加 11.6%,水平双向罕遇地震下最大增加 35.8%,竖向罕遇地震下最大增加 44.1%,三向罕遇地震工况对轴力的影响最大,最大增加 63.7%,板柱节点冲切力在 7 度竖向罕遇地震下最大增加 65%,三向罕遇地震工况最大增幅达到 95%。与静力加载工况 1.3 恒 + 1.5 活相比,三向罕遇地震工况下 2、3 层轴力包络值与之相近,1 层相对小 10%,三向罕遇地震工况下板柱节点冲切力与工况 1.3 恒 + 1.5 活比值 1~3 层分别为 0.88、1.13、1.17,部分楼层超过了目前我国设计规范考虑的量值。

(4) 7 度竖向罕遇地震工况下结构地震影响系数最大值为 0.556,动力系数沿高度变化规律与地震波频谱特性有关,各层最大值平均为 2.68,中间楼层的动力系数较大,最大值达 3.89。为了实现罕遇地震下的安全性要求,建议设计中根据具体工程的分析结果采取差异化增强重点部位承载力与抗震性能的措施。

参考文献:

- [1] 王建东,韩 侃. 华辰冷库结构设计[J]. 建筑结构, 2017,47(S2):139-142.
- [2] 徐佳能,陈跃熙,陈 胜,等. 现代超大型高层冷库预应力无梁楼盖结构施工关键技术[J]. 施工技术, 2021,50(11):146-148,164.
- [3] 周 勇,于连奎,崔 芳,等. 大跨度预应力平板在土建冷库中的应用[J]. 冷藏技术,2023,46(2):36-39.
- [4] 王顺礼. 不平衡弯矩下板柱节点受弯性能参数研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):54-58.
- [5] 王 璐,薛彦涛,王翠坤. 板柱结构体系与板柱节点研究的新进展[J]. 工程抗震与加固改造,2017,39(2):1-10.
- [6] 李 萌,徐梁博,张 婕,等. 带暗梁厚板柱节点抗冲切性能试验研究[J]. 铁道建筑技术,2023(12):1-5,40.
- [7] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 2015 年版. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [8] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 2016 年版. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [9] 冷库设计标准:GB 50072—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [10] 周正华,周雍年,卢 滔,等. 竖向地震动特征研究[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(3):25-29.
- [11] Bozorgnia Y, Campbell K W. The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004,8(2):175-207.
- [12] 韩建平,周 伟. 汶川地震竖向地震动特征初步分析[J]. 工程力学,2012,29(12):211-219.
- [13] 李 宁,刘洪国,刘 平,等. 近断层竖向地震动特征统计分析[J]. 土木工程学报,2020,53(10):120-128.
- [14] 易伟建,王维一. 近场区竖向地震动对钢筋混凝土框架结构抗震性能的影响[J]. 土木工程学报,2012,45(10):81-88.
- [15] 陈才华,王翠坤,张 宏,等. 振动台试验对高层建筑结构设计的启示[J]. 建筑结构学报,2020,41(7):1-14.
- [16] 高华国,张令心,李 行,等. 大比例尺剪力墙住宅楼抗震性能振动台试验研究[J]. 振动与冲击,2022,41(12):117-124.
- [17] 后张预应力混凝土结构施工图表示方法及构造详图:06SG429[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
- [18] 无粘结预应力混凝土结构技术规程:JGJ 92—2004[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [19] 张 帆. 基于分层壳单元的剪力墙抗震结构体系的非线性有限元分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2011.
- [20] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [21] McKenna F T. Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1997.
- [22] Clough R W. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements[R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1966.
- [23] 刘伯权,白绍良,徐云中,等. 钢筋混凝土柱低周疲劳性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动,1998(4):82-89.
- [24] 曲 哲,叶列平. 基于有效累积滞回耗能的钢筋混凝土构件承载力退化模型[J]. 工程力学,2011,28(6):45-51.
- [25] 季 静,欧子健,吴梓楠,等. 基于构件的结构抗震性能评估平台开发及工程应用[J]. 建筑结构,2023,53(6):83-89.