

## 筒仓形地下车库地震响应分析

赵玉成<sup>1</sup>, 白佳星<sup>1</sup>, 王权<sup>2</sup>, 陈思萌<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 衢州市交通设计有限公司, 浙江 衢州 324000)

**摘要:** 为研究地震作用下筒仓形地下车库结构响应的变化规律, 基于振动台试验和数值模拟方法, 通过监测结构应力分布、位移、变形响应以及加速度等指标, 分析了不同入射方向、峰值加速度、加载频率的地震波对结构响应的影响。结果表明: 不同入射方向地震波作用下, 应力集中区域不变; 水平地震波作用时, 结构水平(平行于地面)方向响应大于竖向(重力方向), 竖向地震波作用时则相反, 楼板竖向响应明显; 水平方向-竖向耦合地震波加剧土体振动, 结构应力增大; 峰值加速度变化不改变应力分布, 但会使应力集中现象更显著; 频率过高或过低, 径向应力变化不大。综合来看, 应力主要集中在筒壁与底板、柱与楼板连接处, 是抗震设计重点区域。

**关键词:** 地震作用; 筒仓形车库; 应力分布; 变形响应; 时程分析

**中图分类号:** TU311.3

**文献标识码:** A

## Earthquake Response Analysis of Silo-shaped Underground Parking Garage

ZHAO Yucheng<sup>1</sup>, BAI Jiaxing<sup>1</sup>, WANG Quan<sup>2</sup>, CHEN Simeng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Quzhou City Transportation Design Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang 324000, China)

**Abstract:** To study the variation law of the response of silo-shaped parking garages under the seismic action, vibration table tests and numerical simulation methods were employed. The effect of seismic waves with different incident directions, peak accelerations, and loading frequencies on the seismic response of the structure was analyzed by monitoring the stress distribution, displacement, deformation response, and acceleration of the structure. The results show that the stress concentration areas remain unchanged under different incident directions. When the horizontal seismic wave acts, the response of the structure in the horizontal direction (the direction parallel to the ground) is greater than that in the vertical direction (gravity direction), while when the vertical seismic wave acts, the opposite is true, and the vertical response of the floor slab is obvious. The horizontal-vertical coupled seismic wave intensifies the vibration of the soil and increases the structural stress. The change of peak acceleration does not cause a change in stress distribution, but will make the stress concentration phenomenon more significant. When the frequency is too high or too low, the change of radial stress is not significant. Overall, the stress mainly concentrates at the joints between the cylinder wall and the bottom plate, as well as those between the columns and the floor slabs, which are the key areas for aseismic design.

**Key words:** seismic action; silo-shaped parking garage; stress distribution; deformation response; time history analysis

全国机动车保有量逐年上升,截至2024年5月,机动车保有量达4.4亿辆。不少地区面临停车难、乱停车等问题,车位短缺和汽车数量增长的矛

盾日益突出<sup>[1-2]</sup>。地下立体车库是解决车位短缺问题的有效手段。与传统车库相比,新型筒仓形立体车库具有土地利用率高、机械自动化程度高、

结构简单等优点,可减少交通安全隐患及对环境的影响,符合智慧城市建设的的发展趋势。

近年来,众多学者对筒仓形立体车库开展了研究。焦申华等<sup>[3]</sup>以北京市某地下车库为背景,分析了其变形的特性及变形原因;李庆来等<sup>[4]</sup>以上海国际中心地下车库为例,利用有限元法对圆形基坑开挖产生的土工问题进行分析;李艳星<sup>[5]</sup>分析了圆形车库设计参数、结构计算等内容。地下车库所受的土压力逐渐得到重视,彭四明<sup>[6]</sup>通过有限元软件分析了不同工况下圆筒状地下车库的内力和变形特性,探讨了设计参数的影响。在地下结构抗震设计方面,魏奇科等<sup>[7]</sup>开展了双仓地下管廊振动台试验,得出不同频率地震波作用下内力、加速度和应变的变化规律;韩俊艳等<sup>[8]</sup>研究了纵向非一致振动荷载对地下管道的地震响应,发现结构产生了较大的残余位移,且峰值位移约为一致振动荷载的 2 倍;王彤辉等<sup>[9]</sup>将隧道与地上结构作为整体开展研究,结果表明,隧道与地上结构相互作用效应明显,且受地震动高频脉冲特性的影响较大;Rabeti Moghadam 等<sup>[10]</sup>对地铁隧道的地震动放大模式开展振动台试验和模型计算,发现隧道自由场响应在无量纲周期大于 10 时不受影响。综上所述,我国对筒仓形立体车库研究起步相对较晚,且筒仓结构受力复杂。目前,国内外对竖向筒仓形地下结构地震响应的研究较少。

本文依托筒仓形立体地下车库项目,设计并

开展了振动台模型试验,研究车库不同位置的应力变化。考虑地震波入射方向、地震波峰值加速度等影响因素,建立了筒仓形立体车库地震响应动力模型,分析车库受力特征、变形规律和加速度传递规律。研究成果可为筒仓形立体地下车库抗震设计提供基础。

## 1 地下车库概况

本文以河南省荥阳市某筒仓形立体地下车库项目为工程背景开展研究。地下车库位于山前冲积平原地带,地势平坦,周边地下设施稀少。车库主体结构采用 C30 混凝土,设计为地下 8 层,整体埋深 21 m,筒仓外径 20 m,层高 2.2 m,结构柱直径 0.8 m,外墙厚 35 cm,楼板厚 20 cm。车库中心设直径 6 m、筏板基础的开洞供车辆电梯出入。筒仓形立体地下车库剖面图见图 1。

根据地勘资料,地下车库位于华北断块区南部,地质构造较为复杂,周围有 5 条活动断裂构造带,分别为太行山前断裂带、聊城—兰考断裂带、汾渭断陷盆地构造带、新乡—商丘断裂带和封门口—五指岭断裂带,历史上均发生过不同强度地震。拟建场地土层参数见表 1。

根据《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)<sup>[11]</sup>和现场勘测资料,场地的抗震设防烈度为 7 度,设计分组为第二组,场地类别为 II 类,设计基本地震峰值加速度为 0.1g,忽略发震断裂的影响。

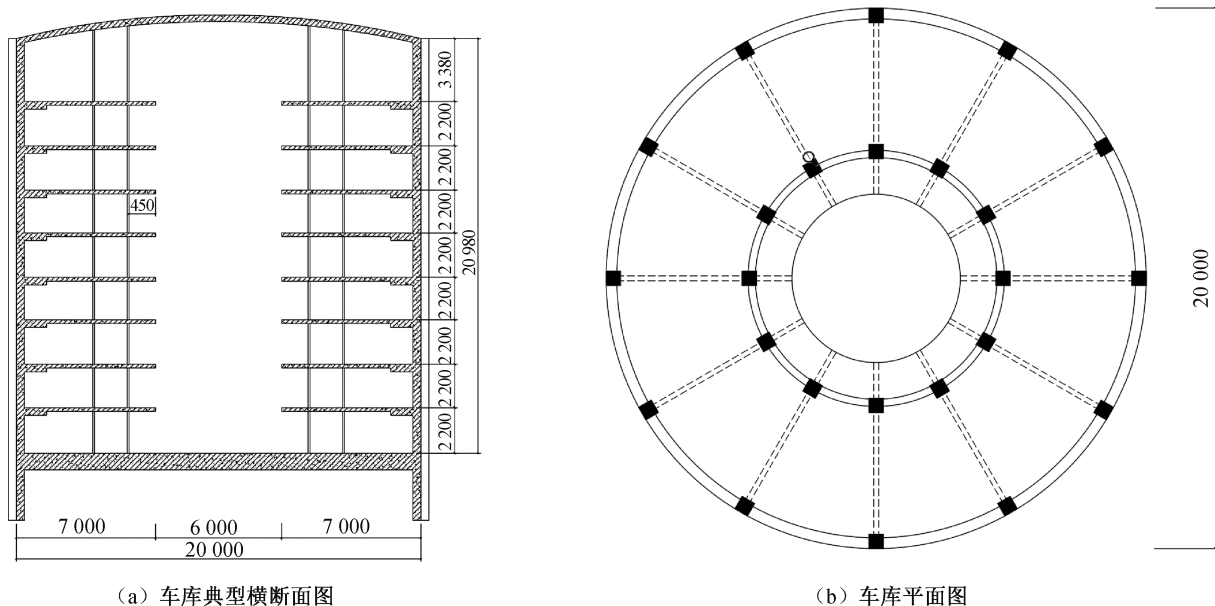


图 1 筒仓形立体地下车库剖面图(单位:mm)

Fig. 1 Cross-section diagrams of the silo-shaped multi-level underground parking garage(unit:mm)

表 1 场地土层参数  
Tab.1 On-site soil layer parameters

| 岩土名称  | 土层厚度/m    | 密度<br>/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量<br>/MPa | 泊松比  | 黏聚力<br>/kPa | 内摩擦角<br>/( $^{\circ}$ ) |
|-------|-----------|--------------------------------------------|--------------|------|-------------|-------------------------|
| 杂填土   | 1.3~3.2   | 2 000                                      | 20           | 0.35 | 15.0        | 15                      |
| 粉土    | 9.7~11.0  | 1 660                                      | 25           | 0.35 | 13.0        | 24                      |
| 粉质黏土  | 11.0~13.1 | 1 860                                      | 35           | 0.30 | 25.5        | 18                      |
| 砾砂    | 7.9~11.0  | 2 000                                      | 100          | 0.30 | 0.0         | 35                      |
| 中风化砂岩 | —         | 2 600                                      | 10 000       | 0.25 | 50.0        | 30                      |

2 相似模型试验研究

2.1 相似关系与相似比

综合考虑振动台尺寸、原型尺寸等因素,本试验模型确定几何相似比为 1:100,利用量纲分析法确定其他参量。以几何尺寸、密度和弹性模量为控制量,相似比如表 2 所示。

表 2 模型试验相似比  
Tab.2 Similarity ratio in model testing

| 物理量  | 相似关系                                | 相似比     |
|------|-------------------------------------|---------|
| 几何长度 | $C_l$                               | 1 : 100 |
| 弹性模量 | $C_E$                               | 1 : 100 |
| 密度   | $C_\rho$                            | 1 : 1   |
| 应力   | $C_\sigma = C_E$                    | 1 : 100 |
| 应变   | —                                   | 1 : 1   |
| 加速度  | $C_a = C_E C_\rho^{-1} C_l^{-1}$    | 1 : 1   |
| 时间   | $C_t = C_l C_E^{-1/2} C_\rho^{1/2}$ | 1 : 10  |
| 位移   | $C_u = C_l$                         | 1 : 100 |
| 泊松比  | —                                   | 1 : 1   |

2.2 相似模型设计与制作

试验采用 ES-10 振动试验系统,装置如图 2 所示。模型箱由高强度亚克力玻璃板制成,尺寸为 60 cm×40 cm×40 cm。为降低边界对地震波的反射影响,在模型箱内壁铺设一层 10 mm 厚的聚苯乙烯板。试验采用石膏和水模拟原型结构中的混凝土,制备了 9 组试样,其膏水比分别为 1.10、1.15、1.20、1.25、1.30、1.35、1.40、1.45、1.50。本研究采用 SY30-2 型三轴仪开展单轴压缩试验,得到弹性模量与膏水比的关系曲线(图 3)。根据相似比计算,模型所需的弹性模量为 315 MPa。经综合分析,最终确定膏水比为 1.10。鉴于试验空间有限,难以制作筒仓内部的柱、梁及盖板,故对模型进行简化处理。

2.3 参数采集设置

为探析筒仓形立体地下车库结构地震响应、



图 2 ES-10 振动试验系统  
Fig.2 ES-10 vibration testing system

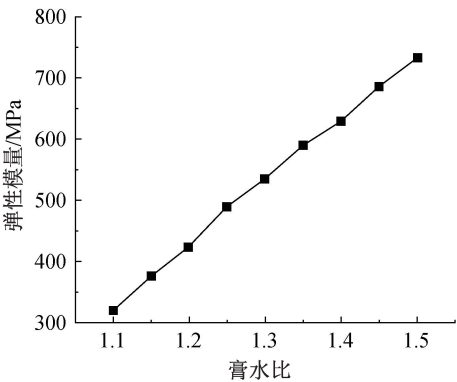
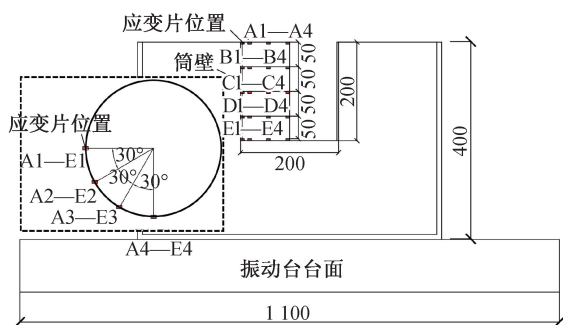


图 3 弹性模量与膏水比曲线图  
Fig.3 Curve of elastic modulus versus binder-to-water ratio

采集应变时程曲线,试验施加水平(平行于地面)方向振动,筒壁以环向变形为主。沿水平方向粘贴 BX120-30AA 型应变片以监测径向应力。根据筒仓对称性,在 1/4 筒壁布设 4 列监测点,每列 5 个,共计 20 个,并按列依次编号为 A、B、C、D、E。监测点与地震波输入方向的夹角分别为 0°、30°、60°、90°。筒仓形结构测点布置图见图 4,模型最终安装图见图 5。

2.4 试验加载方案

振动台模型试验常以正弦波输入荷载指导工程抗震设计<sup>[12-14]</sup>,研究加速度与振动频率对筒仓形结构的影响。本试验通过调整振动台水平方向正弦波的频率和峰值加速度,对筒仓结构施加动力荷载。频率以 0.5 Hz 的降幅从 5 Hz 降至 2 Hz,



(a) 测点布置图 (单位:cm)



(b) 筒仓形结构测点布置图

图4 筒仓形结构测点布置及安装图

Fig. 4 Silo-shaped structure measurement point layout and installation



图5 模型最终安装图

Fig. 5 Final model installation illustration

台面峰值加速度分别为  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 。每次激励前均进行扫频处理。

## 2.5 结果分析

当输入峰值加速度固定为  $0.1g$  时,改变正弦波的频率,不同测点的径向应力峰值与频率的关系如图6所示。当频率为  $2\sim 5\text{ Hz}$  时,筒壁的径向应力峰值变化较小,曲线整体较为平缓。当频率为  $3.0\sim 3.5\text{ Hz}$  时,径向应力峰值出现一个突变。可以发现,在一定的峰值加速度条件下,土体对正弦波频率存在敏感范围,处于该频率范围内的振动荷载在土体中的传播效率较高,能够更有效地传递至地下结构,频率过高或过低均不会引起径向应力显著变化。

图7为代表性频率( $5\text{ Hz}$  和  $2\text{ Hz}$ )下沿结构不同深度测点的径向应力峰值图。两种频率下,径

向应力峰值变化规律基本一致。结构深度  $20\text{ cm}$  处, $0^\circ$  夹角的径向应力峰值最大,在夹角增至  $90^\circ$  过程中持续减小;深度  $0\text{ cm}$  处,径向应力峰值随角度变化不明显;深度  $15\text{ cm}$  处, $30^\circ$  夹角径向应力峰值最大;深度  $10\text{ cm}$  处, $60^\circ$  夹角径向应力峰值最大。

土体对筒壁约束随夹角的增大而减弱。在结构深度  $20\text{ cm}$  处, $0^\circ$  夹角对应的径向应力峰值最大;在其余深度处, $30^\circ$  和  $60^\circ$  夹角下应力突增,原因可能是筒壁振动模式不同导致结构发生扭转或弯曲,使应力重分布,局部应力增大。

当频率固定为  $5\text{ Hz}$  时, $0^\circ$  夹角处不同峰值加速度下的径向应力峰值分布见图8。由图8可知,峰值加速度未改变应力峰值变化规律,径向应力响应随峰值加速度的增加而增大。当峰值加速度为  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$  时,径向应力峰值分别为  $0.081$ 、 $0.161$ 、 $0.257\text{ MPa}$ 。峰值加速度为  $0.2g$ 、 $0.3g$  时的径向应力峰值分别是  $0.1g$  时的  $1.99$  倍和  $3.14$  倍。

## 3 筒仓形地下车库地震响应数值模型建立

本文采用 MIDAS/GTS 软件进行数值模拟,通过时程分析法分析地震作用下筒仓形地下车库的变形特性。研究将从入射方向和峰值加速度展开,重点关注应力、位移和加速度的动态变化。

### 3.1 地震波选取

日本阪神大地震中,大开地铁站损坏极其严重,成为首例因瞬间地面运动引发的现代地下结构地震破坏事件<sup>[15-16]</sup>,暴露了地下结构对低频地震动的脆弱性。基于此,本文选取频带较窄且低频成分丰富的 Kobe 波作为输入激励,模拟地震对地下结构的影响。

本文截取包含峰值加速度的地震波前  $20\text{ s}$  进行精细分析,将采样间隔设定为  $0.02\text{ s}$ 。原始加速度时程曲线如图9所示。为消除模型残余位移,本文采用 SeismoSignal 软件进行基线校正与滤波处理,确保积分后的位移时程曲线基线归0。

### 3.2 筒仓形地下车库模型的建立

根据场地土体参数(表1),将土层厚度分别设置为  $3$ 、 $10$ 、 $12$ 、 $8$ 、 $37\text{ m}$ 。动力分析时,模型范围过大易导致计算效率降低。依据圣维南原理,模型计算范围至少为实际结构尺寸的  $3\sim 5$  倍。综合考虑计算效率与精确性,拟定三维计算模型尺寸为  $150\text{ m}\times 150\text{ m}\times 70\text{ m}$ 。

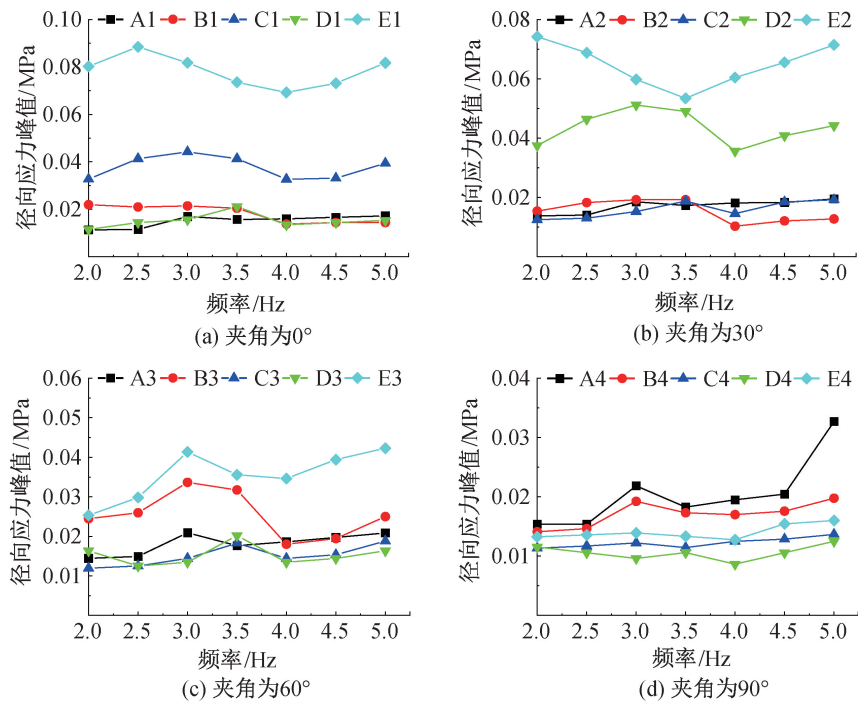


图6 不同频率下测点径向应力峰值

Fig. 6 Radial stress peaks of measurement points at different frequencies

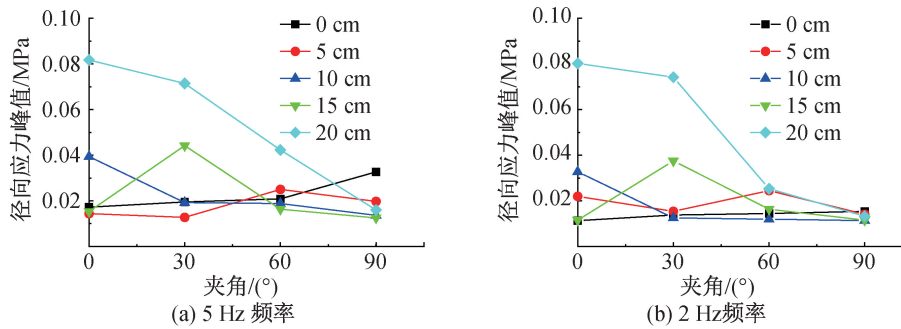


图7 沿结构不同深度测点径向应力峰值

Fig. 7 Radial stress peaks at measurement points along different depths of the structure

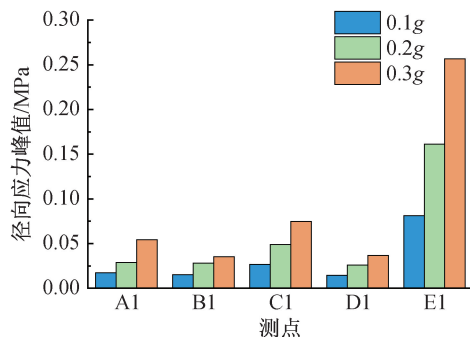


图8 不同峰值加速度下径向应力峰值

Fig. 8 Radial stress peaks under different peak accelerations

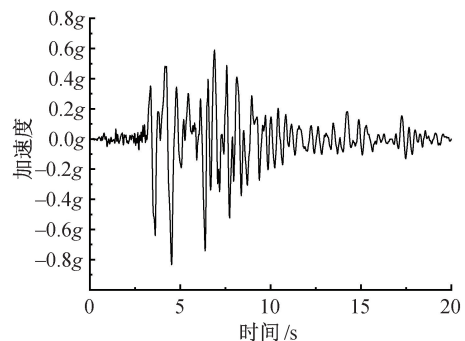


图9 Kobe波加速度时程曲线图

Fig. 9 Acceleration time history curve of Kobe wave

为满足计算精度,单元最大尺寸不应超过最高频率地震波长的  $1/20^{[17]}$ 。车库附近单元长度取 0.5 m,随着与车库距离的增加逐渐增至 3.75 m。整个模型含 143 064 个节点和 220 825 个单元网格,

监测点布置在车库侧壁(A、B、C)与底部(C、D、E),模型及监测点布置见图 10。考虑到地震波反射对计算结果的影响,结构周围采用自由场边界,通过黏性阻尼器实现主网格与自由场边界网格的耦合。

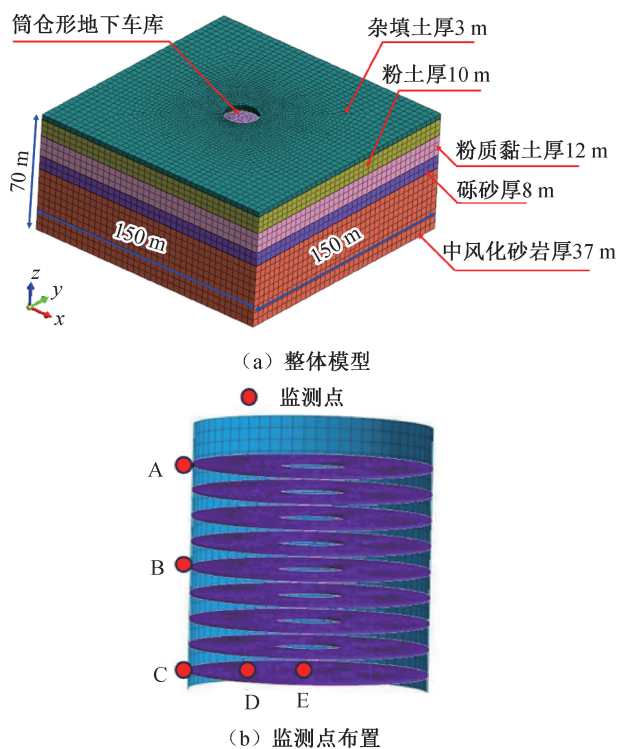


图 10 模型布置图

Fig. 10 Model layout diagram

模型由土体、筒仓形地下车库结构组成。筒仓结构采用 C30 混凝土浇筑,侧墙与土体黏结。侧墙与楼板采用壳单元模拟,梁与柱采用梁单元模拟。各土层采用摩尔-库伦本构模型,C30 混凝土采用弹性本构模型,参数如下:密度为  $2\,500\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $30\,000\text{ MPa}$ ,泊松比为 0.2。

### 3.3 模拟工况

地下结构动力响应受地震波输入方向、地震烈度影响较大<sup>[18]</sup>。模拟时设置 6 种工况(表 3),工况 1—3 侧重于研究水平方向、竖向(重力方向)及水平方向-竖向耦合等不同入射方向下筒仓形结构地震动力响应特征;工况 4—6 侧重于研究耦合地震波作用下峰值加速度为  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$  时筒仓形结构地震动力响应特征。

表 3 模拟工况设置

Tab. 3 Simulation condition settings

| 工况 | 地震波入射方向 | 地震波峰值加速度 |
|----|---------|----------|
| 1  | 水平地震波   | $0.1g$   |
| 2  | 竖向地震波   | $0.1g$   |
| 3  | 耦合地震波   | $0.1g$   |
| 4  | 耦合地震波   | $0.1g$   |
| 5  | 耦合地震波   | $0.2g$   |
| 6  | 耦合地震波   | $0.3g$   |

### 3.4 模型试验与数值模拟对比分析

为验证数值分析的准确性,本文建立了一个与试验模型尺寸相似、参数相匹配的三维模型,向其输入峰值加速度  $0.1g$ 、频率  $2\text{ Hz}$  的正弦波,计算筒仓形结构的动态响应特征。将与加载方向为  $0^\circ$  夹角的径向应力峰值试验结果和模拟结果进行对比(图 11),发现两者分布规律一致,均为筒壁底部最大、顶部最小,筒壁底部、顶部的误差分别为  $12.6\%$ 、 $12.2\%$ 。

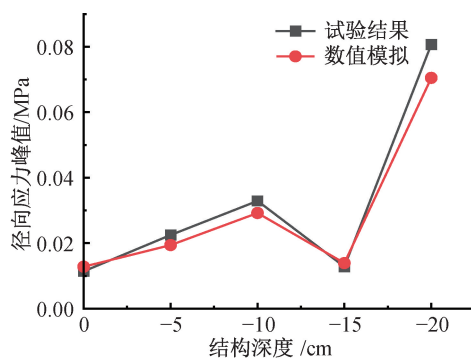


图 11 数值模拟与试验对比

Fig. 11 Comparison of numerical simulation and testing

## 4 不同地震波入射方向下结构动力响应分析

### 4.1 应力响应分析

图 12 为不同地震波入射方向下结构的 Mises 应力云图。对比发现,地震波入射方向对筒仓结构整体应力分布的影响较小,应力峰值主要集中在车库底板与筒壁的交界处。筒壁应力随深度的增加而增大;楼板应力沿径向由外向内递减,柱周应力略有升高,同样呈现出应力集中的现象。

图 13 为结构监测点的 Mises 应力时程曲线。水平方向、竖向及水平方向-竖向耦合地震波入射时,监测点 C 的应力峰值分别为  $1.82$ 、 $0.92$ 、 $2.16\text{ MPa}$ 。水平方向-竖向耦合地震波作用下的应力峰值分别为水平方向、竖向作用下的  $1.19$  倍和  $2.35$  倍。多方向地震波叠加加剧了土体振动,导致结构应力增大。由图 13 还可以看出,竖向地震波作用下应力峰值滞后,响应较小,耦合地震波曲线与水平方向地震波类似,地下结构应力响应主要由水平方向地震波主导。

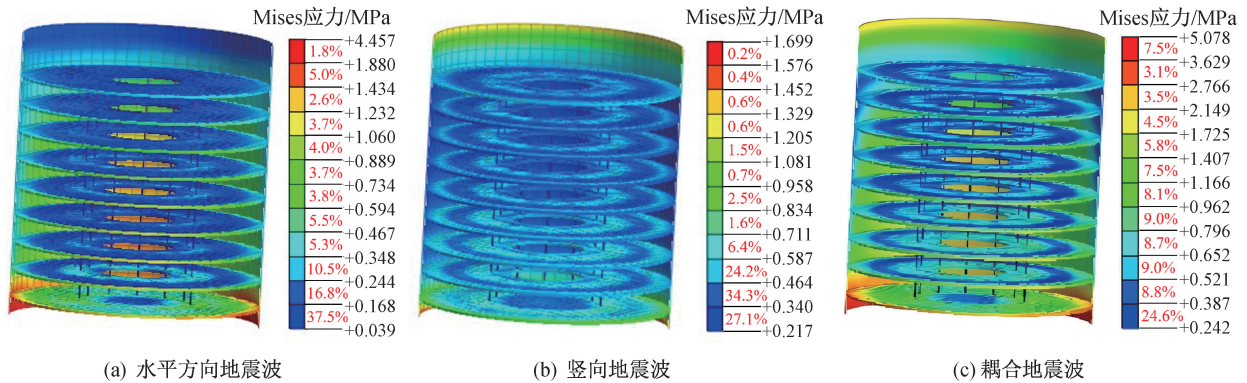


图 12 不同方向地震波作用下 Mises 应力云图

Fig. 12 Mises stress contours under the action of seismic waves in different directions

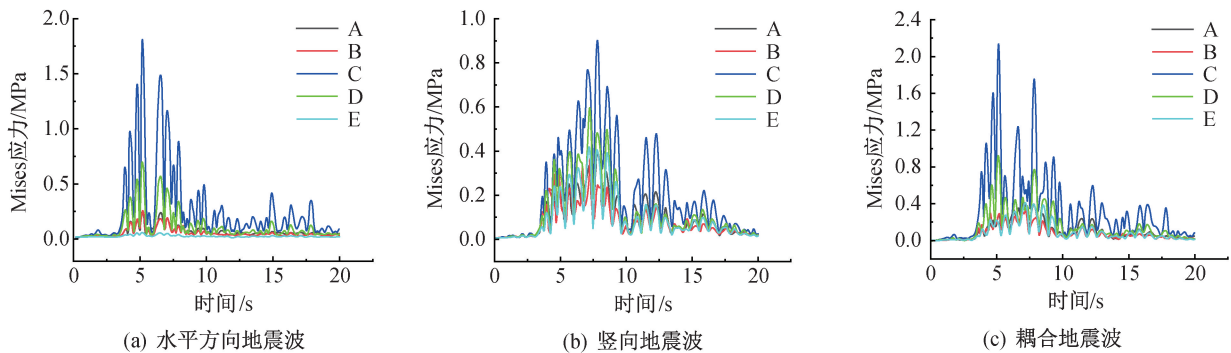


图 13 不同方向地震波作用下应力时程曲线

Fig. 13 Stress time history curves under the action of seismic waves in different directions

#### 4.2 位移响应分析

由图 14、图 15 可知,在耦合地震波作用下,筒壁和底板在水平方向上仅产生轻微变形。与水平方向地震波相比,耦合地震波对结构的水平位移影响较小。与耦合地震波相比,竖向地震波作用时筒壁竖向变形减少了 7.1%,但底板竖向变形却增加了 15.7%。这表明不同方向地震波对结构局部变形的影响差异明显。

筒壁监测点 A、B、C 的水平位移随结构深度增

加而逐渐减小,而竖向位移沿结构深度方向变化不大。底板监测点 C、D、E 的位移能准确反映楼板的位移响应,楼板的水平位移基本保持恒定。由筒壁向结构内部,竖向位移呈逐步减小趋势。

#### 4.3 加速度响应分析

图 16、图 17 为各监测点在不同入射方向地震波作用下的加速度时程曲线。整体加速度响应规律相似,地震波叠加未显著改变曲线趋势和峰值。

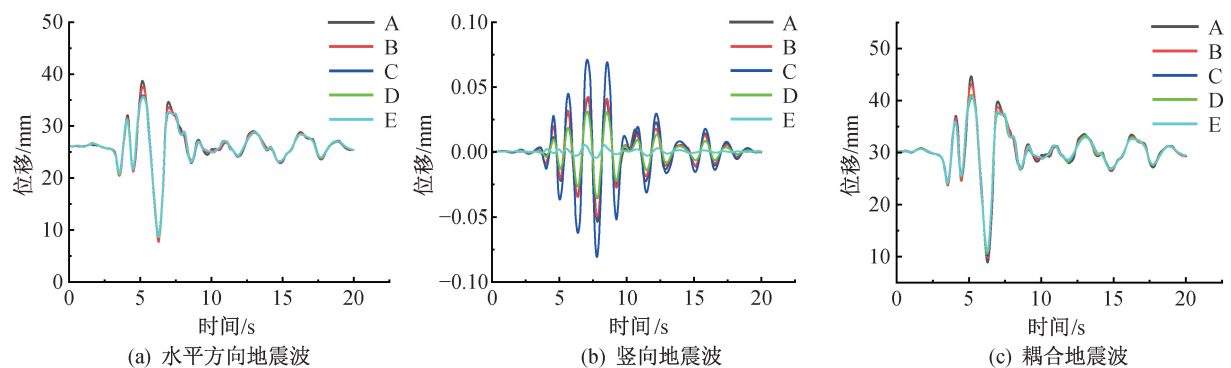


图 14 水平位移时程曲线

Fig. 14 Horizontal displacement time history curves

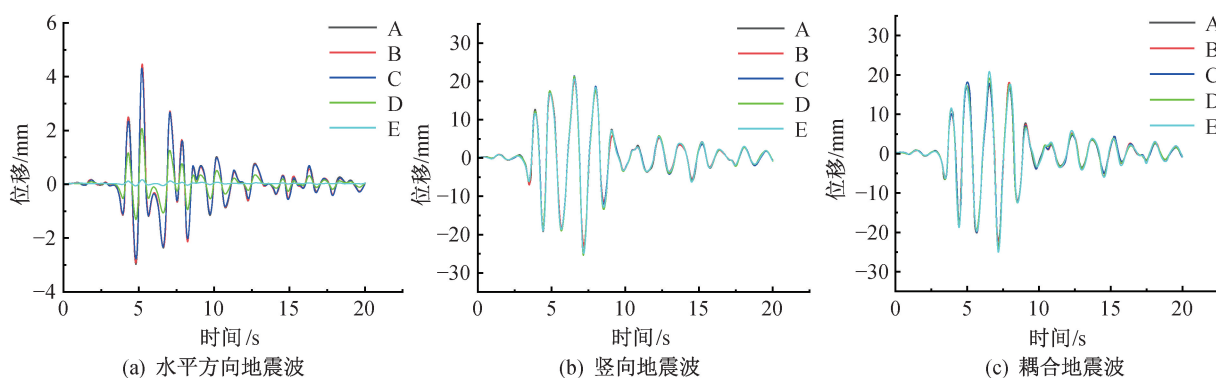


图 15 竖向位移时程曲线

Fig. 15 Vertical displacement time history curves

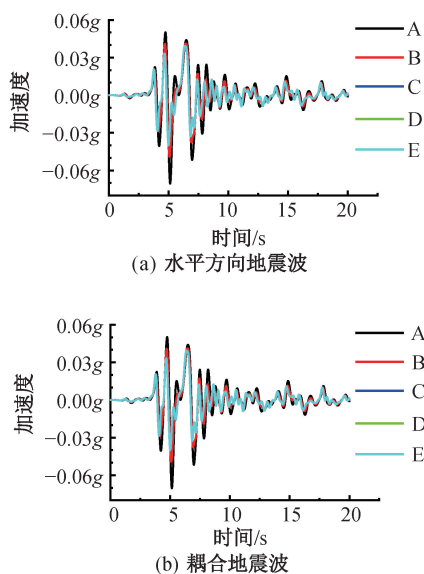


图 16 水平方向加速度时程曲线

Fig. 16 Horizontal acceleration time history curves

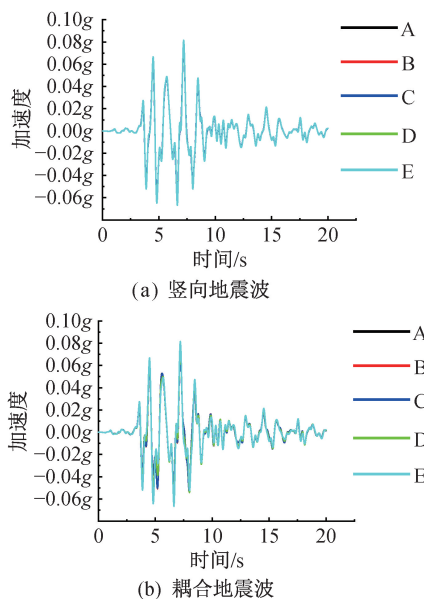


图 17 竖向加速度时程曲线

Fig. 17 Vertical acceleration time history curves

在水平方向地震波作用下,5.14 s 时加速度达到峰值,峰值加速度沿筒壁自顶部向下递减。底板各监测点峰值加速度均为  $0.04g$ ,表明相同高度处的加速度一致。在竖向地震波作用下,峰值加速度出现在 7.2 s,沿筒壁深度无显著变化。各监测点加速度时程曲线高度相似,结构加速度响应略强于水平方向。底板监测点峰值加速度由外向内逐渐增大,依次为  $0.072g$ 、 $0.080g$ 、 $0.083g$ 。

## 5 结构应力响应分析

本节将水平方向地震波峰值加速度分别调至  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ ,分析不同地震波峰值加速度作用下结构的应力响应。

### 5.1 应力响应分析

图 18 为不同峰值加速度地震波作用下结构的 Mises 应力云图。增加地震波峰值加速度不改变结构应力分布,应力峰值点始终位于筒壁外径与底板连接处。柱与楼板支撑处存在应力集中现象,且随峰值加速度增大愈发明显。地震波峰值加速度由  $0.1g$  增至  $0.2g$ 、 $0.3g$  时,Mises 应力分别增大至 2 倍和 3.26 倍。峰值加速度由  $0.2g$  增至  $0.3g$  时,Mises 应力呈非线性增长,这可能是结构应力接近混凝土强度设计值,结构濒临破坏所致。

不同峰值加速度地震波作用下监测点应力时程曲线如图 19 所示,结构的应力分布规律不随地震波峰值加速度改变,应力峰值位于监测点 C 处,且地震波峰值加速度越大,筒仓形结构 Mises 应力越大。

### 5.2 位移响应分析

图 20 为各监测点的水平位移时程曲线。从图

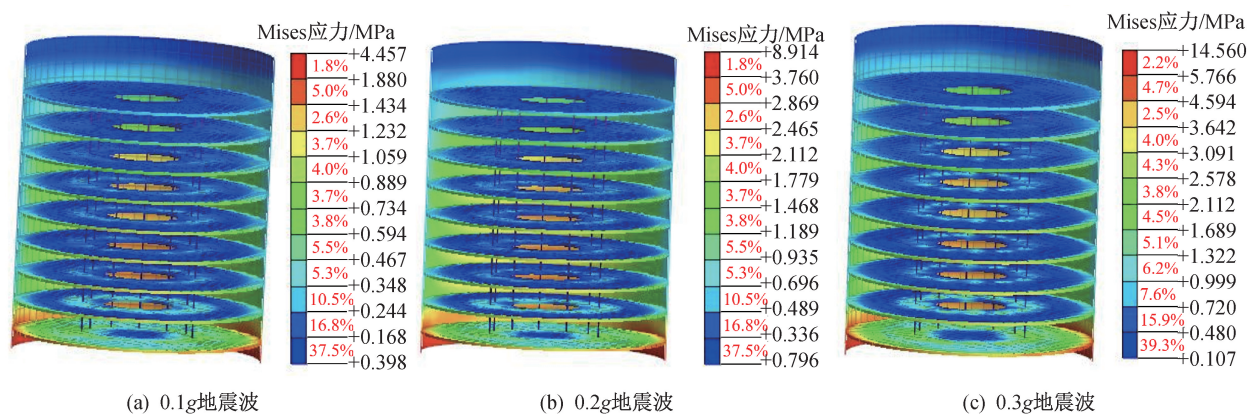


图 18 不同峰值加速度地震波作用下峰值应力云图

Fig. 18 Peak stress contours under the action of seismic waves with different peak accelerations

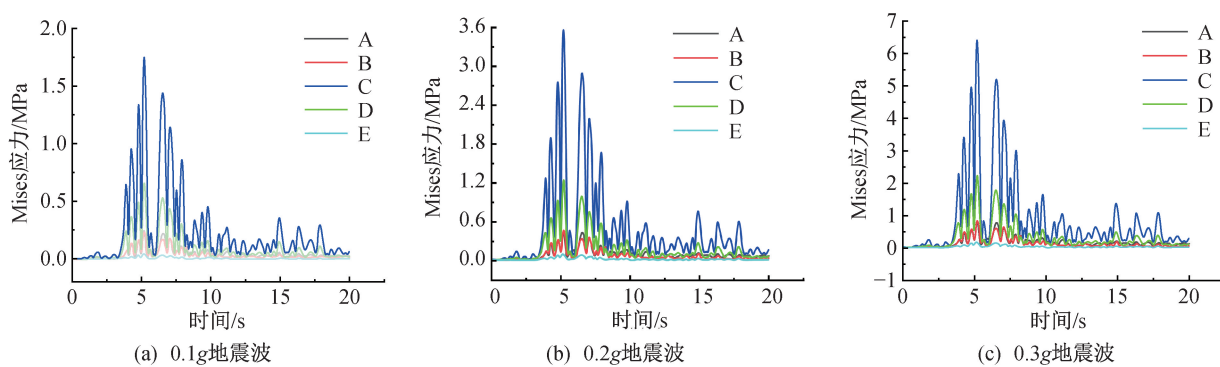


图 19 不同峰值加速度地震波作用下监测点应力时程曲线

Fig. 19 Stress time history curves of measurement points under the action of seismic waves with different peak accelerations

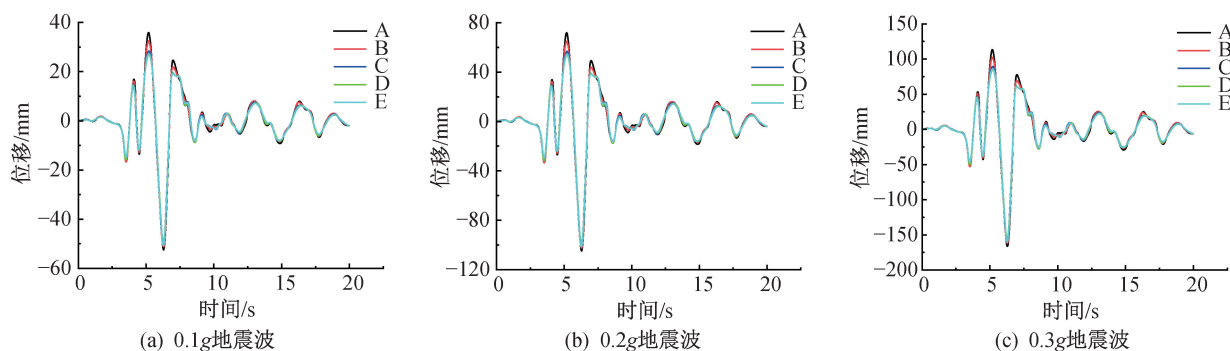


图 20 不同峰值加速度地震波作用下水平位移时程曲线

Fig. 20 Horizontal displacement time history curves under the action of seismic waves with different peak accelerations

中看出,达到位移峰值的时间点不随峰值加速度改变而改变。当地震波峰值加速度为  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$  时,监测点 A 的最大位移分别为 55.78、111.57、167.38 mm。该结果凸显了监测点 A 的位移敏感性。筒壁顶部与底部的水平方向位移差异反映了结构围绕 Z 轴旋转运动的本质特性,进一步验证了结构响应的复杂性和非线性。

由不同结构深度测点的水平位移图(图 21)可知,当地震波峰值加速度加倍时,筒壁水平位移亦相应加倍,筒壁水平位移随深度线性递减,不同地

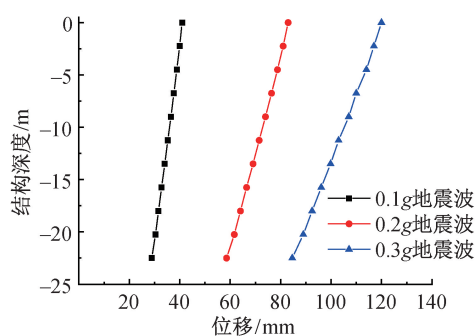


图 21 不同结构深度测点水平位移图

Fig. 21 Horizontal displacements at measurement points along different depths of the structure

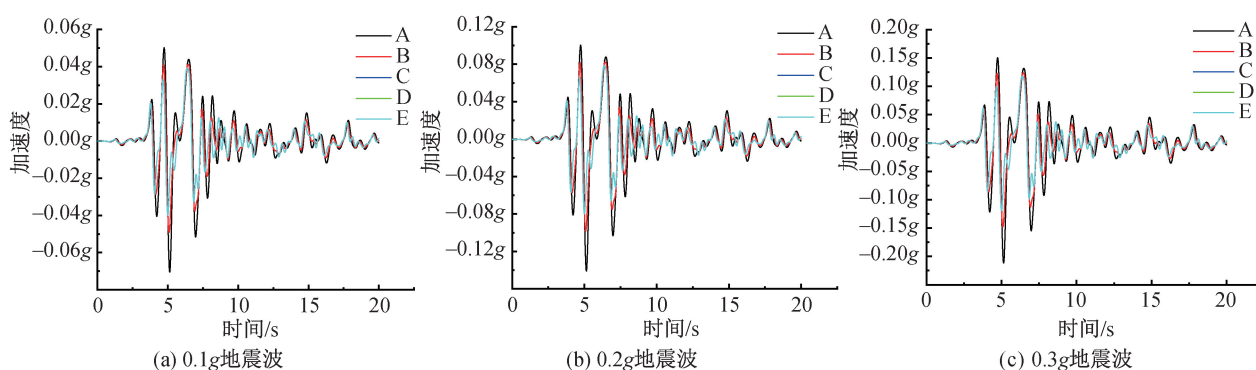


图 22 不同峰值加速度地震波水平方向加速度时程曲线

Fig. 22 Horizontal acceleration time history curves for seismic waves with different peak accelerations

震波峰值加速度下的变形规律一致。以  $0.3g$  地震波为例,结构深度  $0\text{ m}$  与  $22.5\text{ m}$  处最大水平方向相对位移为  $27.69\text{ mm}$ ,最大层间位移角为  $1/813$ ,小于《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)<sup>[11]</sup>规定的  $1/550$ 。

### 5.3 加速度响应分析

各监测点水平方向加速度时程曲线如图 22 所示。当地震波峰值加速度为  $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$  时,监测点 A 的峰值加速度分别为  $0.07g$ 、 $0.14g$ 、 $0.21g$ ,监测点 B 的峰值加速度分别为  $0.049g$ 、 $0.097g$ 、 $0.146g$ ;监测点 C、D、E 峰值加速度相同,分别为  $0.04g$ 、 $0.08g$ 、 $0.12g$ 。各监测点峰值加速度出现时间不随峰值加速度改变,监测点 A、B 峰值出现时间分别为  $5.14\text{ s}$ 、 $5.08\text{ s}$ ,C、D、E 峰值出现时间均为  $5\text{ s}$ 。

不同峰值加速度地震波作用下,各监测点加速度曲线形态稳定,均沿结构深度递减,各监测点加速度随输入地震波峰值加速度增加而近似呈线性增长。

## 6 结论

本研究通过采用振动台试验与构建筒仓形地下车库三维地震响应模型数值分析方法,深入探究不同入射方向、峰值加速度、加载频率的地震波对结构的影响,得出以下结论:

1) 不同入射方向地震波对结构应力分布影响较小,应力峰值位于车库底板与筒壁交界处。水平方向地震波下水水平响应大于竖向响应。水平方向-竖向耦合波作用下结构应力增大,以水平方向地震波主导。竖向地震波与耦合地震波对局部变形影响不同,筒壁竖向变形与底板竖向位移存在

差异。水平方向地震波作用下峰值加速度沿筒壁自上向下递减;竖向各点时程曲线相似、峰值滞后,结构竖向加速度响应优于水平方向。

2) 地震波峰值加速度增加不改变应力分布,但应力集中加剧,最大应力随峰值加速度增大而增大,接近破坏时增幅显著。位移响应随峰值加速度呈线性增长,筒壁水平变形沿结构深度递减规律一致,结构抗震性能良好。加速度响应曲线形态与峰值时刻稳定,沿结构深度递减,随输入峰值近似呈线性增长。

3) 给定峰值加速度下,频率为  $2\sim 5\text{ Hz}$  的地震波对筒壁径向应力影响不明显;频率为  $3.0\sim 3.5\text{ Hz}$  的地震波作用下径向应力发生突变。

### 参考文献:

- [1] 静安共和新路街道:代表联手破题小区“停车难”[J]. 上海人大月刊,2024(7):48.  
Gonghexin Road Street, Jing'an: representatives join hands to solve the problem of "parking difficulties" in residential areas[J]. Shanghai Renda Yuekan, 2024(7):48.
- [2] 蒋蕾,张向东,邢景超,等. 地下停车场建设的综述与展望[J]. 科技风,2020(23):101+112.  
Jiang Lei, Zhang Xiangdong, Xing Jingchao, et al. Summary and prospect of underground parking lot construction[J]. Kejifeng, 2020(23):101+112.
- [3] 焦申华,贾力宏,李莹. 北京市某地下车库基坑工程及事故处理[J]. 岩土工程学报,2008,30(S1):588-591.  
Jiao Shenhua, Jia Lihong, Li Ying. Foundation pit project and its treatment of an underground garage in Beijing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1):588-591.
- [4] 李庆来,申伟强,曹伟飏,等. 上海国际会议中心地下车库兴建所产生的环境土工问题及对策[J]. 地下工

- 程与隧道,2001(3):7-11+48.
- Li Qinglai, Shen Weiqiang, Cao Weibiao, et al. Environmental geo-technique issues and solutions caused by deep excavation of underground garage of Shanghai international conference center[J]. Underground Engineering and Tunnels,2001(3):7-11+48.
- [5] 李艳星. 圆柱型停车库设计与建设实践研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- Li Yanxing. Research on design and construction of cylindrical parking garage[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2018.
- [6] 彭四明. 圆筒状地下车库内力及变形数值模拟分析[D]. 郑州:河南工业大学,2016.
- Peng Siming. Numerical simulation of internal forces and distortion analysis for the cylindrical underground garage[D]. Zhengzhou:Henan University of Technology,2016.
- [7] 魏奇科,韩亮,王振强,等. 双仓地下管廊抗震性能振动台试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2021,41(5):1052-1061.
- Wei Qike, Han Liang, Wang Zhenqiang, et al. Shaking table test study on seismic performance of double box underground utility tunnel [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41 ( 5 ) : 1052-1061.
- [8] 韩俊艳,王小强,郭之科,等. 纵向非一致激励下埋地管道的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(6):1256-1266.
- Han Junyan, Wang Xiaoqiang, Guo Zhike, et al. Shaking table test of buried pipelines under longitudinal non-uniform excitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(6):1256-1266.
- [9] 王彤辉,李小军,陈红娟,等. 场地-隧道-地上建筑结构体系地震响应的振动台试验[J]. 防灾减灾工程学报,2023,43(4):742-751.
- Wang Tonghui, Li Xiaojun, Chen Hongjuan, et al. Shaking table test of seismic response of site-tunnel-aboveground building structure system [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43 ( 4 ) : 742-751.
- [10] Rabeti Moghadam M, Baziar M H. Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: shaking table testing and numerical simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2016,83:81-97.
- [11] GB/T 50011—2010 建筑抗震设计标准[S].
- GB/T 50011—2010 Standard for seismic design of buildings[S].
- [12] 刘应慈. 重塑软土震陷引起的单桩负摩阻力振动台试验对比研究[D]. 廊坊:防灾科技学院,2022.
- Liu Yingci. Comparative study on shaking table test of single pile negative friction caused by seismic settlement of remolded soft soil[D]. Langfang:Institute of Disaster Prevention,2022.
- [13] 陈虹羽,蒋关鲁,何晓龙,等. 正弦波与 EL 波作用下桩身土压力响应对比研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(5):1708-1717.
- Chen Hongyu, Jiang Guanlu, He Xiaolong, et al. Comparative study on soil pressure response of pile under sine wave and EL wave[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2023,20(5):1708-1717.
- [14] 徐鹏,蒋关鲁,邱俊杰,等. 整体刚性面板加筋土挡墙振动台模型试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(3):998-1004.
- Xu Peng, Jiang Guanlu, Qiu Junjie, et al. Shaking table tests on reinforced soil retaining walls with full-height rigid facing[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(3):998-1004.
- [15] 张庆龙. 震撼日本的兵库县南部地震[J]. 水利水电科技进展,1996(4):24-26.
- Zhang Qinglong. The Southern Hyogo prefecture earthquake that shook Japan[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,1996(4):24-26.
- [16] 李腾雁,马宁,严斌. 日本阪神大地震概要[J]. 工程抗震,1996(1):34-38.
- Li Tengyan, Ma Ning, Yan Bin. Summary of the great Hanshin-Awaji earthquake in Japan [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,1996(1):34-38.
- [17] 董凯,米占宽. 弹性和柔性地基上动力人工边界及地震动输入方法[J]. 水电能源科学,2020,38(5):101-105.
- Dong Kai, Mi Zhankuan. Seismic wave input methods of artificial boundary on elastic and flexible foundations [J]. Water Resources and Power,2020,38(5):101-105.
- [18] 薛景宏,陆大伟,李东瑞,等. 地震波斜入射下埋地腐蚀管道地震响应分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2024,41(4):18-27+35.
- Xue Jinghong, Lu Dawei, Li Dongrui, et al. Seismic response analysis of buried corroded pipelines under incident seismic waves[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2024,41(4):18-27+35.

(责任编辑 张爱丽)