文章编号：1007-2993（2026）04-0534-08

近断层脉冲型地震作用下砂土地基埋地管道动力响应研究

谢忠武[1]　邹　毅[1]　张　顺[2]　蔡国帧[1]　李　森[1]　宋来福[2]　蔡嘉煜[2]
（1. 温州市教育基建中心，浙江温州　325000；2. 温州大学 建筑工程学院，浙江温州　325035）

【摘要】 近断层脉冲型地震作用下饱和砂土液化会加剧埋地管道的上浮和破坏，严重威胁埋地管道的长期安全运行。为探究近断层脉冲地震作用下埋地管道的动力响应，基于谱-随机函数方法，提出了一种生成非平稳近断层地震动时程的方法；基于生成的近断层脉冲型地震动，系统研究了近断层脉冲地震作用下砂土地基埋地管道的液化机理和动力响应，分析了与非脉冲地震动作用下埋地管道动力响应的差异。结果表明：合成的含有低频脉冲的地震动能够有效模拟近断层地震动的脉冲特征；在地震作用下，孔隙水压力上升、土体有效应力丧失致使土壤液化引发管道漂移、上浮；与非脉冲地震动相比，近断层脉冲型地震动对管道的动力响应影响更大，对管道的危害大，严重威胁管道的安全运行。

【关键词】 近断层脉冲型地震；埋地管道；液化；数值模拟
【中图分类号】 TU435　【文献标识码】 A　doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0126

Dynamic response of buried pipelines in sandy foundations subject to near-fault pulse-type seismic loading

XIE Zhongwu[1]　ZOU Yi[1]　ZHANG Shun[2]　CAI Guozhen[1]　LI Sen[1]　SONG Laifu[2]　CAI Jiayu[2]
(1. Wenzhou Education Capital Construction Center, Wenzhou 325000, Zhejiang, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China)

【Abstract】 The liquefaction of saturated sandy soil under the influence of near-fault pulse seismic loading exacerbates the buoyancy and destruction of buried pipelines, posing a serious threat to their long-term safe operation. To investigate the dynamic response of buried pipelines under near-fault pulse seismic loading, this paper proposes a method for generating non-stationary near-fault seismic motion time histories based on the spectral-stochastic function method. Based on the generated near-fault pulse seismic motion, the liquefaction mechanism and dynamic response of buried pipelines in sandy soil foundations under near-fault pulse seismic loading are systematically studied, and the differences from the dynamic response of buried pipelines under non-pulse seismic loading are analyzed. The results show that the synthesized seismic motion containing low-frequency pulses can effectively simulate the pulse characteristics of near-fault seismic motion; under seismic loading, the rise in pore water pressure and the loss of effective stress in the soil lead to soil liquefaction, causing pipeline drift and buoyancy. The pulse-type seismic loading has a greater impact on the dynamic response of the pipeline, causing greater damage and posing a serious threat to the safe operation of the pipeline.

【Key words】 near-fault pulse seismic loading; buried pipeline; liquefaction; numerical simulation

0　引言

随着城市的快速发展和城镇化水平的不断提高，城市对水、电、煤气以及燃油等能源的需求日益增大。埋地管道作为主要的能源传输工具，对于城市的正常运行与发展发挥着重要的作用，已成为城市的重要生命线工程之一。埋地管道覆盖范围广，遍布人类生活的各个角落，其中很大一部分管道需要穿过地质环境复杂、地震频发的地区，严重威胁管道的安全运行。同时，若埋地管道地处断层附近，当地震发生时断层附近会产生一种含有低频速度脉冲的地震动，即近断层脉冲型地震动。近断层地震具有显著的速度脉冲，并伴随着残余地面位移的地震动。在长周期、短持

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52378364）；浙江省自然科学基金项目（LTGG23E080003）
作者简介：谢忠武，男，1977 年生，大学本科，主要从事埋地管道数值模拟研究。E-mail: 15968759810@163.com
通信作者：宋来福，男，1985 年生，博士，副教授，主要从事埋地管道力学性能及安全评价研究。E-mail: songlaifu_jia@wzu.edu.cn

时的速度脉冲作用下使管道发生损坏。此外, 地震发生时会产生较大的次生灾害, 例如 2023 年 12 月 18 日, 甘肃积石山发生 6.2 级地震, 地震引发了液化、砂涌等次生地质灾害, 土壤液化、砂涌是威胁管道安全运行的主要地震次生灾害之一, 会进一步加速管道的破坏。埋地管道一旦发生破坏等严重事故, 将造成难以估量的生命、财产损失。因此, 开展近断层脉冲地震作用下砂土液化对埋地管道的动力响应研究, 对于保障埋地管道工程的安全运行具有重要意义。

地震液化作用下埋地管道的动力响应一直是学术界关注的重点课题之一。许多学者通过理论分析、数值模拟及物理试验对地震液化作用下的管道响应进行了研究。理论研究方面, Agrawal 等[1] 用正弦函数模拟了地震长周期的速度脉冲波。杨福剑[2] 依据混合模型思想通过引入等效脉冲模型对小波包方法进行改进, 提出了一种改进的近断层脉冲型地震动模拟方法。Makris[3] 采用三角函数模型和近断层脉冲型地震动速度时程中脉冲个数特征, 定义了两类等效脉冲模型, 即单瓣脉冲和双瓣脉冲。Somerville[4] 提出了通过脉冲周期和脉冲幅值两个参数表述的三段简化脉冲模型。Newmark[5] 提出了基于小变形理论的埋地管道分析方法; Wang 和 Yeh[6] 改变了地基土性质, 将埋地管道简化为简单的二维梁模型, 并指出非液化时管道轴向阻力增大, 液化时管道因液化产生的浮力使其管道轴向应力降低; Wang 和 Zhang[7] 基于实际工程的阻尼值, 分析了液化场地下入口处埋地管道的水平响应; 林均岐和熊建国[8] 基于虚功原理, 提出了一种考虑管道初始轴力和土壤非线性作用的液化场地管道浮力响应模型; de Groot 等[9] 解释了饱和非黏性土液化及相关现象的理论背景, 并指出了在冲击荷载作用下, 孔隙水压力呈累积、消散及减小的变化趋势; 卢红前等[10] 针对管道上浮问题, 研究了通过改良地基土消除管道上浮和下沉的方法。数值模拟研究方面, Lim 等[11] 假设管道为弹性地基梁, 考虑了地面的永久变形, 研究了地震液化条件下管道的变化规律; 屈铁军等[12] 应用统计学原理, 考虑了地震动的随机性, 分析了地震动传播速度对管道内力的影响; 吴　懿和林建华[13] 分析了地震液化引起的管道动力响应, 并研究了管道大变形防控措施; 包日东和闻邦椿[14] 对地震液化的管道模型进行了简化, 分析了地震作用下埋地管道的力学响应, 探究了不同参数对管道浮动的影响; Zhu 等[15] 考虑了管−土相互作用, 分析了大直径管道的上浮力随管轴椭圆度的变化; Madabhushi 等[16] 采用有限元法详细分析了液化场地矩形截面隧道的动力响应, 研究了不同渗透系数对其影响; 陈艳华等[17] 利用 ADINA 有限元软件, 建立液化场地埋地管道的有限元模型, 并分析了不同因素对管道的影响; Yang 和 Li[18] 采用有限元法对液化场地的三通埋地管道进行了力学响应分析, 并分析了不同管径、密度及埋深等因素对管道响应的影响; 徐　斌等[19] 考虑地震动的随机性, 对埋地管道进行了随机动力分析和可靠度评价。在试验研究方面, Nisho[20] 进行了砂土液化时管道的动力响应试验研究, 指出管道在土中会发生变形, 产生较大的轴向应变; Mohri 等[21] 通过振动台试验, 对不同管道的抗浮措施进行了研究; Towhata 等[22] 基于振动台试验分析了液化场地埋地管道的动力响应; Shimamura[23] 采用动态离心机模型试验研究了液化时位移对管道水平和轴向荷载的影响; Ling 等[24] 基于离心机模型试验模拟了液化时管道的漂浮过程, 提出了一种管道抗浮简化设计方法; Chian 等[25] 进行了大量的试验研究, 指出场地液化导致地下结构上浮需要达到一定的地震加速度能量, 地下结构上浮概率与震级正相关; Xu 等[26] 通过试验研究发现, 土壤液化后刚性管道的法向力要比稳定土中的管道高数倍, 且水平法向合力增加约一个数量级。

虽然学术界对近断层地震动模拟和对结构的响应研究取得了很多成果, 但仍存在以下问题需要解决: (1)现有的研究多基于 Winkler 弹性地基梁模型开展液化区埋地管道的动力响应, 忽略了管道与土体间的相互作用力; (2)现有的成果很少涉及近断层脉冲型地震动对场地液化时埋地管道的动力响应研究, 并对脉冲和非脉冲地震作用下埋地管道的响应和规律进行分析。因此, 本文建立了三维液化场地−混凝土管涵分析模型, 用以真实地反映管涵的应力状态。基于谱−随机函数方法, 提出了一种生成非平稳近断层地震动时程的方法, 并进行数值模拟分析, 研究脉冲和非脉冲地震对混凝土埋管的影响规律。

1　近断层脉冲型地震动模拟

本节从脉冲地震动量化识别、提取及随机建模等内容, 介绍近断层脉冲型地震动合成方法。

1.1　近断层脉冲型地震动量化识别

脉冲幅值和脉冲周期是低频速度脉冲的重要指标, 本文采用 PPM 法进行脉冲周期识别, 采用简谐冲函数拟合速度脉冲, 具体表达式为[27]:

$$V_{\mathrm{P}}(t)=\begin{cases}\dfrac{V_{\mathrm{P}}}{2}\left\{1+\cos\left[\dfrac{2\pi}{N_{\mathrm{c}}T_{\mathrm{P}}}(t-T_{\mathrm{Pk}})\right]\right\} & \\ \cos\left[\dfrac{2\pi}{T_{\mathrm{P}}}(t-T_{\mathrm{Pk}})+v\right] & t_{\mathrm{s}}<t<t_{\mathrm{e}}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

式中：V_{P}为低频脉冲幅值；T_{P}为脉冲周期；N_{c}为脉冲旁瓣循环个数；T_{Pk}为 PGV 所对应的时刻；v 为脉冲旁瓣与主瓣的角度；$t_{\mathrm{s}}=T_{\mathrm{Pk}}-\dfrac{N_{\mathrm{c}}\times T_{\mathrm{P}}}{2}$，$t_{\mathrm{e}}=T_{\mathrm{Pk}}+\dfrac{N_{\mathrm{c}}\times T_{\mathrm{P}}}{2}$。一个完整的循环脉冲，$N_{\mathrm{c}}=1$，为了快速识别可令 $v=0$，则该模型可以确定 4 个参数，由此可通过最小二乘法确定脉冲周期T_{p}。

1.2 近断层脉冲型地震动量化提取

本文基于频率上限为 1.5 Hz 的低通滤波器，以降低加速度时程中高频成分对低频成分的影响，其表达式为：

$$\chi^2(V_{\mathrm{P}},T_{\mathrm{P}},N_{\mathrm{c}},T_{\mathrm{Pk}},v)=\frac{1}{2}\min\sum_{j=1}^{N}[v(t_j)-v_{\mathrm{P}}(t,V_{\mathrm{P}},T_{\mathrm{P}},N_{\mathrm{c}},T_{\mathrm{Pk}},v)] \tag{2}$$

在拟合过程中，本文采用人工蜂群算法进行脉冲提取，该算法能够模拟蜜蜂觅食行为，丢弃不佳方案，逐步改进、优化方案，以寻求最优的解决方案。

1.3 低频脉冲的参数统计特征

本文通过相关性分析确定相关系数，建立线性函数关系，其余参数为随机变量。相关性计算公式为：

$$\rho=\frac{n\sum(\ln X\ln Y)-\sum\ln X\sum\ln Y}{\sqrt{n\sum(\ln X)^2-\left(\sum\ln X\right)^2}}\times\frac{1}{\sqrt{n\sum(\ln Y)^2-\left(\sum\ln Y\right)^2}} \tag{3}$$

式中相关系数ρ的取值范围(−1, 1)，$\rho>0$为正相关，$\rho<0$为负相关，$\rho=0$参数之间无相关性。

基于文献 [28]，经过相关性分析，将$\sigma_{\ln\mathrm{PGV}}$，N_{c}，T_{p}，T_{pk}和 v 作为随机变量，服从独立正态分布或对数正态分布，其均值和标准差如表 1 所示。

1.4 近断层脉冲型地震动合成

近断层脉冲型地震动包含低频成分和高频成分，低频部分采用式(1)数学模型，高频部分由谱表示法(式(4))生成[29]。

表 1 合成近断层脉冲型地震动的随机变量

Tab. 1 Random variables for synthetic pulsed ground motion

参数	分布	均值	标准差
T_{P}	正态	6.75	2.56
$\sigma_{\ln\mathrm{PGV}}$	正态	0	0.29
T_{Pk}	正态	27.8	3.1
v	正态	1.94	2.58
N_{c}	对数正态	0.74	0.24

$$a(t_i)=e(t_i)\sum_{k=0}^{M}\sqrt{2S(\omega_{\mathrm{k}})\Delta\omega}\times[\cos(\omega_{\mathrm{k}}t_i+\phi_{\mathrm{k}})+\sin(\omega_{\mathrm{k}}t_i+\phi_{\mathrm{k}})] \tag{4}$$

式中：$\Delta\omega=(\omega_{\mathrm{u}}-\omega_{\mathrm{l}})$为频率增量；$\omega_{\mathrm{k}}=\omega_{\mathrm{l}}+k(\omega_{\mathrm{u}}-\omega_{\mathrm{l}})/N$为离散角频率；$\omega_{\mathrm{u}}$为截止频率上限；$\omega_{\mathrm{l}}$为截止频率下限；$N$ 为频率离散点数；ϕ_{k}为 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布随机变量。$e(t_i)$为包络函数：

$$e_{\mathrm{t}}=\begin{cases}0 & t<t_0\\ \left(\dfrac{t-t_0}{t_{\mathrm{Pk}}-t_0}\right)^{\alpha} & t_0\le t_{\mathrm{Pk}}\\ \exp[-\beta(t-t_{\mathrm{Pk}})] & t>t_{\mathrm{Pk}}\end{cases} \tag{5}$$

$S(\omega_{\mathrm{k}})$为近断层脉冲型地震动加速度功率谱：

$$S(\omega)=\frac{\omega^2}{\omega^2+\left(\dfrac{1}{\Gamma}\right)^2}\times\frac{1+4\xi_{\mathrm{g}}^2\left(\dfrac{\omega}{\omega_{\mathrm{g}}}\right)^2}{\left[1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_{\mathrm{g}}}\right)^2\right]^2+4\xi\left(\dfrac{\omega}{\omega_{\mathrm{g}}}\right)^2}S_0 \tag{6}$$

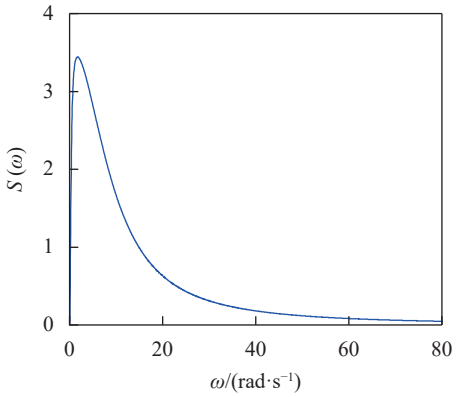
式中 4 个功率谱参数按文献 [30] 取值，S_0=3.51，ω_{g}=1.4494，ξ_{g}=3.2122，Γ=3.1289。

本文以假设工程场址为例(断层距离为 10 km，为近断层地震动)，模拟场址脉冲型地震加速度时程见图 1。

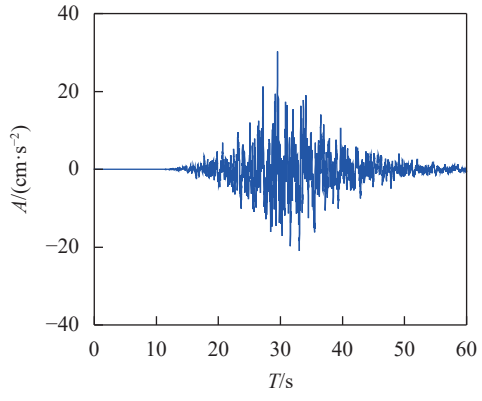
2 计算模型与参数

采用 FLAC3D 软件对近断层地震作用下埋地管道的动力响应进行分析。整体模型尺寸为 30 m×8 m×10 m，管道半径 1.1 m，厚度为 0.2 m，管道埋深 1.4 m。模型采用 6 面体划分网格，土体共计 30275 个节点，28224 个单元；管道共计 5760 个节点，1152 个单元。计算模型见图 2。

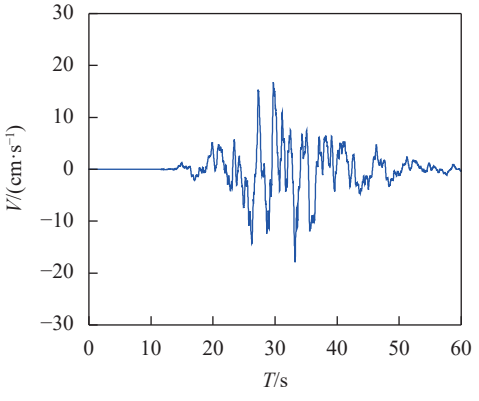
根据需要对模型施加静力和动力边界条件和初始条件。对模型左右两侧施加 X 方向约束，对模型前后面施加 Y 方向约束，模型底部施加 Z 方向约束。在 FLAC3D 软件中采用自由场边界特别设计用于模拟无限域，能够显著降低边界处波反射的影响，选择



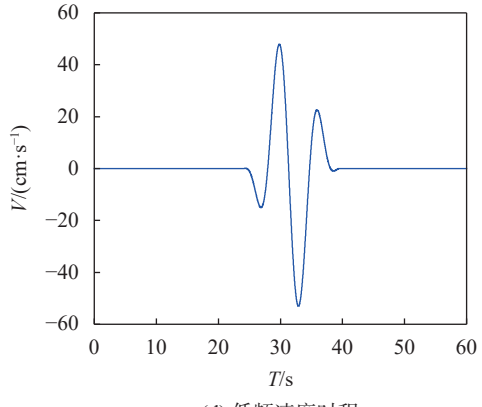
(a) 近断层功率谱曲线



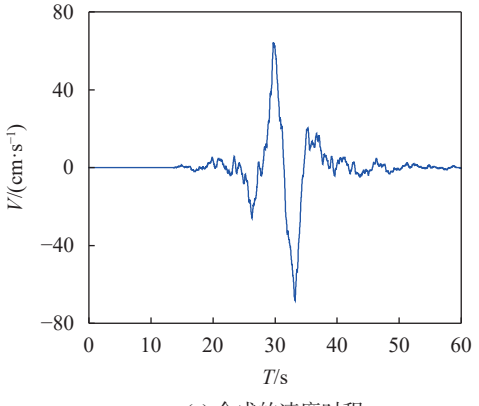
(b) 高频加速度时程



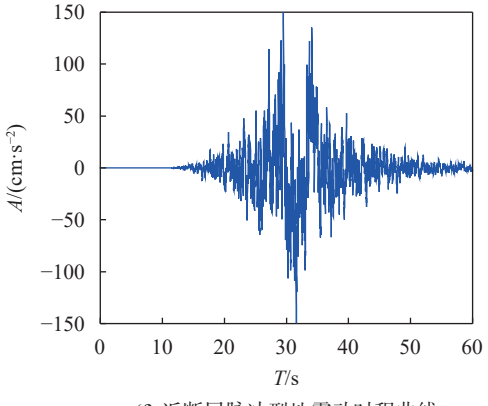
(c) 高频速度时程



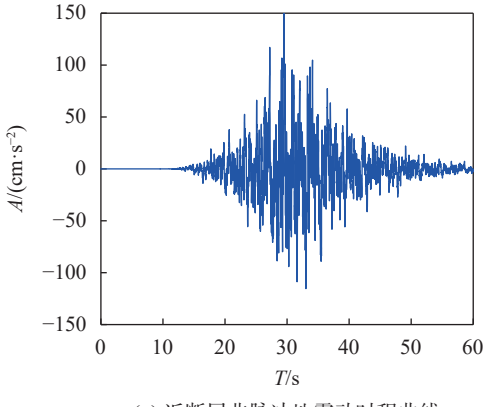
(d) 低频速度时程



(e) 合成的速度时程



(f) 近断层脉冲型地震动时程曲线



(g) 近断层非脉冲地震动时程曲线

图 1　近断层脉冲型地震动合成

Fig. 1　Synthesis of near-fault pulse-like ground motions

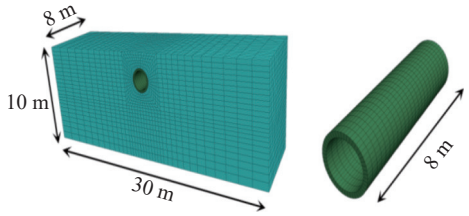


图 2 数值模拟计算模型图

Fig. 2 Numerical simulation calculation model diagrams

自由场边界可以最大程度模拟实际情况并提高计算结果的可信度(见图 3)。同时,设定底部和四周为不透水边界,模型顶部不施加任何约束。

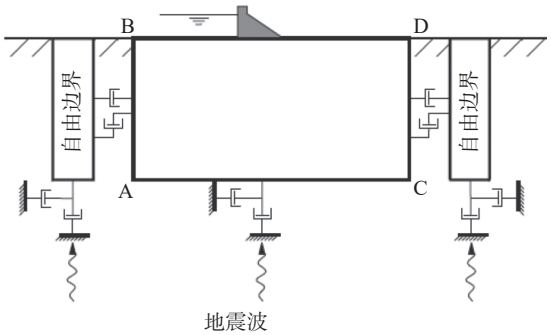


图 3 自由场边界图

Fig. 3 Free-field boundary diagram

对于考虑动态孔隙水压力变化的本构模型,选择 Finn 模型以模拟动载作用下土体内孔隙水压力的响应。

进行动力分析的多步计算设置,输入外部地震荷载。在输入地震荷载前,需使用专门的软件如 Seismo Signal 对地震波记录进行滤波和基线校正,以确保数据的准确性。滤波用来去除不必要的噪声,基线校正用来保证地震波形正确反映地面运动,无人为或仪器引起的误差。

管道采用弹性模型,土体采用 Mohr-Coulomb 模型,模型基本参数如表 2 所示。管土的接触面参数中的c和φ取土层参数的 0.5 ~ 0.6,法向刚度和切向刚度采用式(7)计算:

$$K_{\mathrm{n}} = K_{\mathrm{s}}' = 10\max\frac{\left(K+\dfrac{4G}{3}\right)}{\Delta z_{\min}} \tag{7}$$

式中:K 为土的体积模量,MPa;G 为土体的剪切模量,MPa;$\Delta z_{\min}$为接触面法向连接区上的最小尺寸,mm。

3 计算结果分析

通过上述近断层脉冲型地震动生成的方法,生成 1 条近断层脉冲型地震动时程曲线和 1 条非脉冲地震动时程曲线,总持时 60 s,时间步长 0.01 s,PGA 为 0.4g,分别计算近断层脉冲地震作用和非脉冲地震作用下埋地管道的动力响应。

表 2 计算模型参数

Tab. 2 Calculate model parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
土体	27	0.35	2000	0	35
管道	43.6	0.25	2700		

图 4—图 6 展示了不同类型地震作用下埋地管道底部土体的超孔隙水压力。在地震作用下埋地管道底部土体瞬时产生了超孔隙水压力,并随着时间的推移超孔隙水压力持续增大,在 30 s 左右达到顶峰,然后保持相对稳定的状态。模型底部的超孔隙水压力最大,随着土层深度的减小,超孔隙水压力逐渐减小。管道底部的超孔隙水压力在 20 s 左右出现峰值,此后缓慢增长;而等深度处的其他位置,超孔隙水压力却在持续增长,增加了与管道底部的水头差,致使继续增强了渗流压力。由此可见,土体的液化是自下而上逐渐降低的。

图 7—图 8 给出了管道水平、竖向位移变化曲线图。由图可知,地震初始阶段,管道的水平和竖向位移缓慢增加。随着时间的推移,管道的水平位移在 30 ~ 40 s 出现往复运动,此时管道的竖向位移开始发生显著的错动上升,竖向位移随时间的推移持续

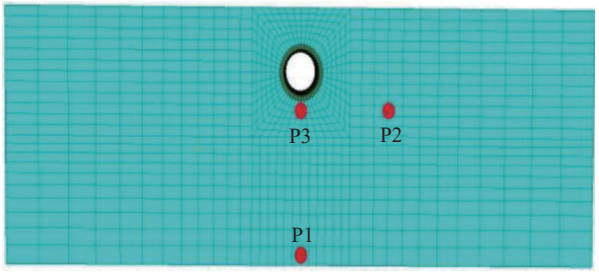


图 4 监测点位置示意图

Fig. 4 Schematic location of monitoring points

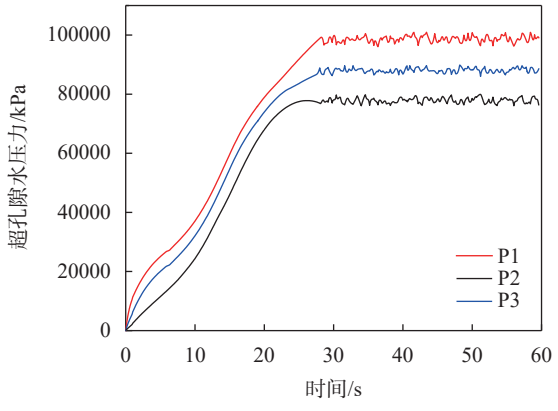


图 5 不同监测点超孔隙水压力时程曲线图

Fig. 5 Time course curve of super pore water pressure at different monitoring points

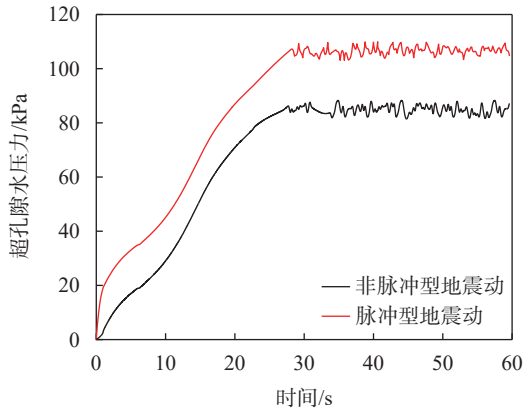


图 6　超孔隙水压力时程曲线图

Fig. 6　Hyperporous water pressure time-course graph

增大。当时间达到 50 ~ 60 s 时, 管道的水平和竖向位移增加幅度减小, 趋于平缓。在地震的作用下, 管道发生了明显的上浮, 呈现出渐进过程, 表明地震作用下管道的非线性发展。随着地震能量的持续输入, 管道底部土体完全液化, 土体丧失有效应力; 同时由于管道−土的相互作用, 深远场地孔压大于管道下方土体的孔压, 致使产生远场场地向管道底部的渗流压力, 这是地震作用下场地液化管道上浮的主要原因。

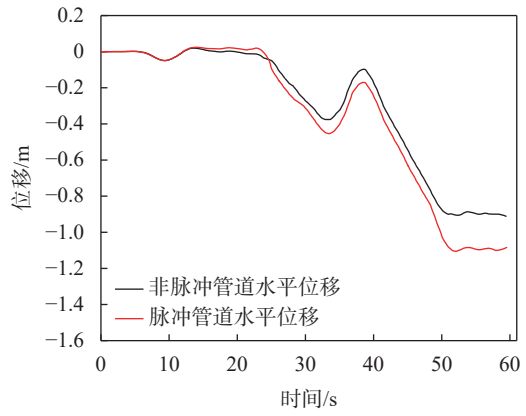


图 7　管道水平位移变化曲线图

Fig. 7　Horizontal displacement curve

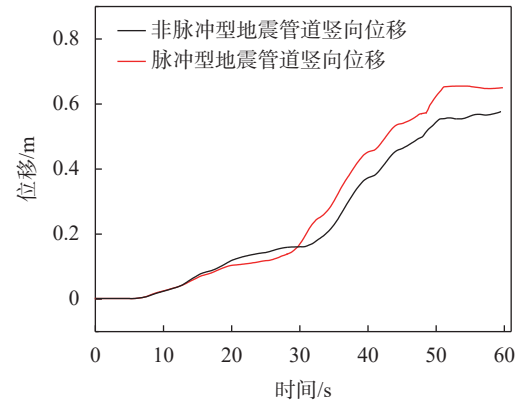


图 8　管道竖向位移变化曲线图

Fig. 8　Vertical displacement variation curve of pipeline

非脉冲地震作用下管道的水平位移为沿 X 轴负方向移动 0.94 m, 竖向位移沿 Z 轴上浮 0.64 m。相比于非脉冲地震动作用, 近断层脉冲地震作用下管道的水平位移和竖向位移均比较大, 水平位移为沿 X 轴负方向移动 1.1 m, 竖向位移沿 Z 轴上浮 0.52 m。

图 9—图 10 给出了脉冲和非脉冲地震作用下管道的轴向和环向应力图。由图可知, 相比于非脉冲地震作用, 脉冲型地震作用下管道的环向应力更大、轴向应力较小, 这是因为非液化时管道轴向阻力增大, 液化时管道因液化产生的浮力使其管道轴向应力降低。

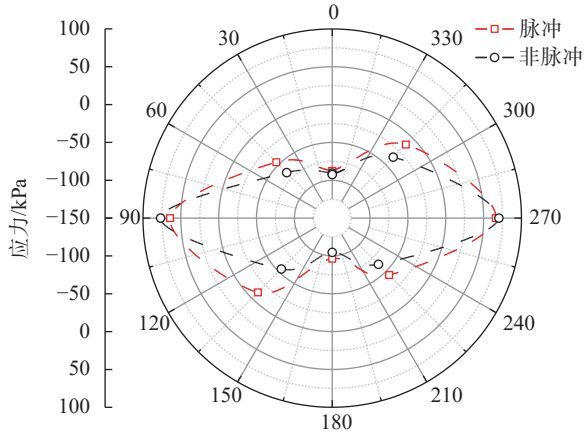


图 9　管道轴向应力图

Fig. 9　Pipe axial stress diagram

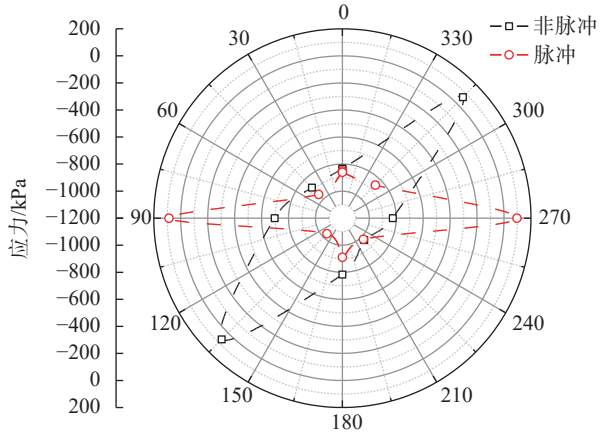


图 10　管道环向应力图

Fig. 10　Pipe circumferential stress diagram

4　结论

本文基于谱−随机函数方法, 提出了一种生成非平稳近断层地震动时程的方法。建立了三维液化场地−混凝土管涵分析模型, 用以真实地反映管涵的应力状态。基于生成的近断层脉冲型地震动时程曲线进行了埋地管道动力响应分析, 研究了脉冲和非脉冲地震对混凝土埋管的影响规律。主要结论如下:

(1)采用 PPM 法进行脉冲周期识别,简谐冲函数拟合速度脉冲,基于具有全局寻优性的人工蜂群算法量化提取近断层脉冲型地震动,确定低频脉冲的参数相关性,建立线性函数关系,合成含有低频脉冲的地震动能够有效模拟近断层地震动的脉冲特征。

(2)地震分析结果表明,地震作用下孔隙水压力上升、土体有效应力丧失,致使土壤液化,引发管道漂移、上浮,管道两侧土壤运动与管道底部形成的渗流压力差进一步加剧了管道的漂移、上浮,深入探究了地震作用下管道的变形机理,为管道的抗震安全设计提供重要的依据。

(3)脉冲和非脉冲地震作用下埋地管道的动力响应规律研究表明,与非脉冲地震动相比,近断层脉冲型地震动对管道的动力响应影响更大,对管道的危害大,严重威胁管道的安全运行。

参 考 文 献

[1] AGRAWAL A K, YANG J N. Optimal placement of passive dampers on seismic and wind-excited buildings using combinatorial optimization[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(12): 997-1014.

[2] 杨福剑. 近断层地震动模拟与框架结构地震响应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. (YANG F J. Near-fault ground motion simulation and seismic response analysis of frame structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))

[3] MAKRIS N. Rigidity-plasticity-viscosity: can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions?[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26(5): 571-591.

[4] SOMERVILLE P G. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 137(1/4): 201-212.

[5] NEWMARK N M. Problems in wave propagation in soil and rock[M]//Selected Papers by Nathan M. Newmark: Civil Engineering Classics. New York: ASCE, 2015: 703-722.

[6] WANG L R L, YEH Y H. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1985, 13(1): 75-96.

[7] WANG L R L, ZHANG H. Buried pipeline system in a liquefaction environment[C]//Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering. Madrid, Spain, 1992: 5529-5534.

[8] 林均岐, 熊建国. 液化场地土中埋设管线的上浮反应分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(2): 97-100. (LIN J Q, XIONG J G. Analysis for floating response of buried pipeline in liquefied soil[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(2): 97-100. (in Chinese))

[9] DE GROOT M B, BOLTON M D, FORAY P, et al. Physics of liquefaction phenomena around marine structures[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2006, 132(4): 227-243.

[10] 卢红前, 汉 会, 朱永强, 等. 液化场地处循环水系统埋地管道的地基处理 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2011, 44(S1): 205-209. (LU H Q, HAN H, ZHU Y Q, et al. Ground treatment of buried conduit for circulating water system in liquefied soil[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(S1): 205-209. (in Chinese))

[11] LIM Y M, KIM M K, KIM T W, et al. Seismic behavior of pipelines during transverse liquefaction considering effects of ground deformation[C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000: 906.

[12] 屈铁军, 王前信. 地下管线在空间随机分布的地震作用下的反应 [J]. 工程力学, 2003, 20(3): 120-124. (QU T J, WANG Q X. Seismic response of underground pipelines to ground motion with spatial randomness[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 120-124. (in Chinese))

[13] 吴 懿, 林建华. 基于可靠度的地震液化引起地面大位移对管线影响的分析 [J]. 工业建筑, 2004, 34(6): 52-54. (WU Y, LIN J H. Analysis of effect of large ground displacement by seismic liquefaction on underground pipling based on reliability theory[J]. Industrial Construction, 2004, 34(6): 52-54. (in Chinese))

[14] 包日东, 闻邦椿. 液化土中输流管道的竖向地震响应研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(4): 173-177. (BAO R D, WEN B C. Study on seismic response of buried pipeline in liquefied soil[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(4): 173-177. (in Chinese))

[15] ZHU X X, XUE S F, TONG X H, et al. Uplift response of large-diameter buried pipeline in liquefiable soil using pipe-soil coupling model[C]//International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2011. Beijing, China: ASCE, 2011: 1790-1801.

[16] MADABHUSHI S S C, MADABHUSHI S P G. Finite element analysis of floatation of rectangular tunnels following earthquake induced liquefaction[J]. Indian Geotechnical Journal, 2015, 45(3): 233-242.

[17] 陈艳华, 李六军, 李冬冬, 等. 液化场地下埋地管道上浮

反应影响因素分析 [J]. 世界地震工程, 2016, 32(4): 182-187. (CHEN Y H, LI L J, LI D D, et al. Influence factor analysis of floatation response of buried pipeline in liquefied soil[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(4): 182-187. (in Chinese))

[18] YANG C S, LI S Q. Theoretical analysis and finite element simulation of pipeline structure in liquefied soil[J]. Heliyon, 2021, 7(7): e07480.

[19] 徐 斌, 陈柯好, 王星亮, 等. 液化土中管道随机地震响应分析与可靠度评价研究 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 81-89. (XU B, CHEN K H, WANG X L, et al. Stochastic seismic response analysis and reliability evaluation of pipelines in liquefied soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 81-89. (in Chinese))

[20] NISHIO N. Dynamic strains in buried pipelines due to soil liquefaction[Z]. Earthquake Behavior of Buried Pipelines, Storage, Telecommunication, and Transportation Facilities, PVP-162, ASME, 1989: 83-89.

[21] MOHRI Y, KAWABATA T, LING H I. Experiments on shallowly buried pipeline using shaking table[C]//Proceedings of the 10th Earthquake Engineering Symposium. Toyko, 1998: 1913-1916.

[22] TOWHATA I, VARGAS-MONGE W, ORENSE R P, et al. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(5): 347-361.

[23] SHIMAMURA K, HAMADA M, YASUDA S, et al. Load on pipes buried in a non-liquefaction layer due to liquefaction-induced ground displacement[C]// Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000: 0492.

[24] LING H I, MOHRI Y, KAWABATA T, et al. Centrifugal modeling of seismic behavior of large-diameter pipe in liquefiable soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1092-1101.

[25] CHIAN S C, TOKIMATSU K, MADABHUSHI S P G. Soil liquefaction-induced uplift of underground structures: physical and numerical modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(10): 04014057.

[26] XU X B, XU G H, REN Y P, et al. Horizontal normal force on buried rigid pipelines in fluctuant liquefied silty soil[J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(1): 1-8.

[27] MAVROEIDIS G P, PAPAGEORGIOU A S. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1099-1131.

[28] 宋佚博. 近断层脉冲型地震动随机模拟及高土石坝随机动力响应分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2023. (SONG Y B. Stochastic simulation of pulsed ground motion near-fault and stochastic dynamic response analysis of high rockfill dam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023. (in Chinese))

[29] 李 杰, 刘章军. 基于标准正交基的随机过程展开法 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2006, 34(10): 1279-1283. (LI J, LIU Z J. Expansion method of stochastic processes based on normalized orthogonal bases[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(10): 1279-1283. (in Chinese))

[30] 周继磊. 近断层强震作用下结构随机抗震分析和力学系统混沌控制 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014. (ZHOU J L. Stochastic seismic analysis of structures subjected to near-fault strong ground motions and chaos control for mechanical systems[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese))

收稿日期: 2025-03-19