

DOI: 10.11779/CJGE20221096

液化土中管道随机地震响应分析与可靠度评价研究

徐斌^{1,2}, 陈柯好^{1,2}, 王星亮^{1,2}, 庞锐^{*1,2}

(1. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 海岸和近海工程国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024)

摘要: 地震作用下饱和砂土液化会导致埋地管道上浮, 引起系统功能失效。为探究液化场地中埋地管道的地震响应和可靠度水平, 充分考虑地震动的随机性和非平稳性, 提出了基于概率密度演化法和等价极值分布的概率分析方法, 从超孔隙水压力、加速度和结构位移变形三方面对埋地管道进行随机动力分析和可靠度评价。结果表明: 地震动的随机性对埋地管道的动力响应有显著影响, 传统的确定性分析方法可能会低估管道的地震响应, 提出的分析方法能较全面地研究管道的上浮机理和可靠度水平; 地震作用下, 孔隙水压力上升, 导致土壤有效应力下降, 进而发生土壤液化是管道上浮的主要原因; 两侧土壤向管道底部的挤压和指向管底的渗流压力进一步加剧了管道的抬升。最后, 基于成灾机理研究了U型碎石排水对埋地管道的减灾效果和机理。提出的随机概率分析方法, 可以对管道的上浮机理和可靠度做出较为准确的分析。

关键词: 液化土; 埋地管道; 随机地震; 概率分析; 上浮机理

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2024)01-0081-09

作者简介: 徐斌(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与高土石坝抗震、粗粒土力学特性等方面的研究工作。E-mail: xubin@dlut.edu.cn。

Stochastic seismic response analysis and reliability evaluation of pipelines in liquefied soil

XU Bin^{1,2}, CHEN Kehao^{1,2}, WANG Xingliang^{1,2}, PANG Rui^{1,2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The liquefaction of saturated sand under the action of earthquakes can cause the buried pipeline to float up and the system failure. To investigate the seismic response and reliability level of buried pipelines in liquefaction sites, a probabilistic analysis method based on the probability density evolution method and equivalent extreme value distribution is proposed to fully consider the randomness and non-stationarity of ground shaking. According to the excess pore water pressure, acceleration and displacement of structures, the random dynamic analysis and reliability assessment of the buried pipeline are carried out. The results show that the randomness of ground motion has a significant effect on the dynamic response of buried pipelines, and the traditional deterministic analysis methods may underestimate the seismic response of pipelines. The proposed method can be used to comprehensively study the floating mechanism and reliability level of buried pipelines. Under the action of earthquakes, the pore water pressure increases, which leads to a decrease in the effective soil stress, and then liquefaction of the soil occurs, causing the pipe to float up. The compression of soil at both sides towards the bottom of the pipe and the seepage pressure towards the bottom of the pipe further aggravate the uplift of the pipe. Finally, the disaster mitigation effect and mechanism of U-shaped gravel drainage on buried pipelines are studied based on disaster mechanism. The proposed stochastic probability analysis method can be employed to accurately evaluate the buoyancy mechanism and reliability of pipelines.

Key words: liquefied soil; buried pipeline; stochastic earthquake; probability analysis; floating mechanism

0 引言

埋地管道是生命线工程系统的重要组成部分, 通常承担着供水、供电、通信等重要任务。近年的几次大地震中, 地下管线普遍遭到地震破坏, 这不仅造成生命线系统功能失效, 而且会引发火灾、爆炸、阻碍

救援等次生灾害。研究发现, 液化区埋地管道的破坏率(1 km的破坏处数)远大于非液化区的埋地管道。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279096, 52279125, 52009017)

收稿日期: 2022-09-05

*通信作者(E-mail: pangrui@dlut.edu.cn)

这是因为地震过程中, 场地中砂土的孔隙水压力上升, 有效应力下降, 进而导致砂土抗剪强度逐渐降低而液化^[1], 管道受到了额外的上浮力发生上浮甚至浮出地面。因此国内外学者对液化场地中埋地管道的地震响应和抗震措施进行了广泛的研究^[2-3]。

目前的研究大多采用确定性分析方法, 通过振动台试验^[1]或有限元方法研究埋地管道的地震响应^[4], 并据此提出了一些抗上浮措施, 如碎石排水、振捣夯实土体、土工布加固等, 其中 U 型碎石排水的抗上浮效果较好^[5]。但是地震的产生和发展具有极强的不确定性, Chian 等^[1]、Madabhushi 等^[6]和屈铁军等^[7]的研究表明, 地震动的类型、强度等随机性特征对埋地管道的地震响应有显著影响。Pang 等^[8]、刘汉龙^[9]和 Zhou 等^[10]的研究表明, 地震动随机性引起同一结构的动力响应可达数倍之差。由确定性分析得出的结论具有一定的局限性, 很难全面反映地震的不确定性对管道上浮反应的影响。因此有必要充分考虑地震动的随机性, 从概率和统计的角度全面研究液化场地下埋地管道的上浮机理和抗震措施的减灾效果。

本文采用随机函数-谱表示法和改进的功率谱模型生成了一系列随机地震动, 联合概率密度演化法和等价极值分布, 基于加速度、超孔隙水压力、上浮位移三个指标, 对埋地管道的响应规律进行了随机动力分析和可靠度评价, 探究了 U 型碎石排水措施的减灾机理和效果。

1 等价极值分布和概率密度演化法

Li 等^[11]以概率密度演化分析的基本思想为基础, 从结构动力响应基本方程出发, 通过引入状态相关向量, 建立了概率密度演化方程, 为多自由度非线性结构的随机响应分析和可靠度评价提供了一个高效的方法。

一般来说, 管道在随机地震荷载作用下的动力方程可以表示为^[12]

$$\bar{\mathbf{M}}(\boldsymbol{\Theta})\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}(\boldsymbol{\Theta})\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}(\boldsymbol{\Theta})\mathbf{X}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}_g(\boldsymbol{\Theta}, t)。 \quad (1)$$

式中: $\bar{\mathbf{M}}$, \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为管道的有效质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{X} , $\dot{\mathbf{X}}$ 和 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别为位移、速度和加速度矢量; $\ddot{\mathbf{X}}_g(\boldsymbol{\Theta}, t)$ 为随机动力激励过程; $\boldsymbol{\Theta}$ 为随机向量。

式 (1) 的解可以简单地表示为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\Theta}, t) \quad , \quad (2)$$

其中, $\mathbf{H} = (H_1, H_2, H_3, \dots, H_m)^T$ 。

依据上述形式, 对于研究管道地震响应所关心的物理量(如加速度等)可表示为 $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m)^T$, m 为物理量个数, 则有^[13]

$$Y(t) = H_Y(\boldsymbol{\Theta}, t) \quad . \quad (3)$$

对于方程 (1) 描述的随机动力系统, 在给定时间区间 $[0, T]$ 内的极值依赖于随机参数 $\boldsymbol{\Theta}$ 。则地震作用下 $Y(t)$ 的极值可表示为

$$Z_Y = \max(|H_Y(\boldsymbol{\Theta}, t)|, t \in [0, T]) \quad . \quad (4)$$

对于给定的 $\boldsymbol{\Theta}$, Z_Y 是存在且唯一的, 其表达式为

$$Z_Y = W_Y(\boldsymbol{\Theta}, T) \quad . \quad (5)$$

因此, 可以构造以 τ 为“虚拟时间参数”的随机过程:

$$Q_Y(\tau) = Y_{\Theta} \tau = W_Y(\boldsymbol{\Theta}, T) \tau \quad , \quad (6)$$

显然,

$$Q_Y(\tau)|_{\tau=0} = 0, \quad Z_Y = Q_Y(\tau)|_{\tau=1} \quad . \quad (7)$$

对式 (7) 关于 τ 求导, 有

$$\dot{Q}_Y = \frac{\partial Q_Y}{\partial \tau} = W_Y(\boldsymbol{\Theta}, T) \quad . \quad (8)$$

$(Q(\tau), \theta)$ 构成一个随机动力系统, 其联合概率密度函数 $p_{Q\Theta}(q, \Theta, \tau)$ 的概率密度演化方程为

$$\frac{\partial p_{Q\Theta}(q, \Theta, \tau)}{\partial \tau} + W(\theta, T) \frac{\partial p_{Q\Theta}(q, \Theta, \tau)}{\partial q} = 0 \quad . \quad (9)$$

其初始条件为

$$p_{Q\Theta}(q, \Theta, t)|_{t=0} = \delta(q) p_{\Theta}(\theta) \quad , \quad (10)$$

式中, $\delta(q)$ 为 Dirac 函数。

边界条件为^[14]

$$p_{Y\Theta}(y, \Theta, t)|_{y_i \rightarrow \infty} = 0 \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad . \quad (11)$$

联合式 (9) ~ (11), 可以得到

$$p_Q(q, \tau) = \int_{Q_\Theta} p_{Q\Theta}(q, \Theta, \tau) d\Theta \quad . \quad (12)$$

由式 (7) 进一步可得

$$p_{Y_Z}(y) = p_Q(q, \tau)|_{q=y, \tau=1} \quad . \quad (13)$$

对于实际工程问题, 联合物理方程 (1) 和概率密度演化方程 (9), 使用数值解法(如 TVD 格式有限差分法等)求解, 即可获得所关心物理量的概率信息。

2 谱表示-随机函数法

地震动在强度、频率等方面都具有极强的随机性, 且对埋地管道的地震响应有显著影响, 因此获得非平稳随机地震动样本是随机动力响应分析的首要前提。本文采用谱表示-随机函数法生成了一系列地震加速度时程, 并验证了其有效性。

梁建文^[15]推导得到了单变量、一维、均值为零的非平稳随机过程的表达形式:

$$X(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_X(t, \omega)\Delta\omega} [\cos(\omega_k t)X_k + \sin(\omega_k t)Y_k] \quad . \quad (14)$$

式中: $\{X_k, Y_k\}$ ($k=1, 2, 3, \dots, N$) 为标准正交随机变量; $S_X(t, \omega)$ 为功率谱模型, 本文选用广义 C-P 模型^[16]; $\Delta\omega$ 为频率间隔, 取 0.1 rad/s ; N 为截断项数, 取 2500 。

本文采用非高斯型的标准正交随机变量来构造随机函数。首先假设 \bar{X}_n 和 \bar{Y}_n ($n=1, 2, 3, \dots, N$) 是一组标准

正交随机向量, 可以表示为

$$\bar{X}_n = \text{cas}(n\Theta_1), \bar{Y}_n = \text{cas}(n\Theta_2) \quad (n=1,2,3,\dots,N) \quad (15)$$

其中, $\text{cas}(x) = \cos(x) + \sin(x)$ 为 Hartley 正交基函数; 基本随机变量 Θ_1 和 Θ_2 在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布。为保证其随机性, 将 $\{\bar{X}_n, \bar{Y}_n\}$ 重新排列即可得到所需的标准正交随机向量 $\{X_k, Y_k\} (k=1,2,\dots,N)$ 。

本文基于现行的建筑结构抗震设计规范, 生成了峰值加速度为 $0.2g$ 的 144 个加速度时程, 其加速度时程样本均值、标准差和反应谱与目标值的对比如图 1 所示, 生成样本与目标值拟合程度良好, 可以应用于随机响应分析。

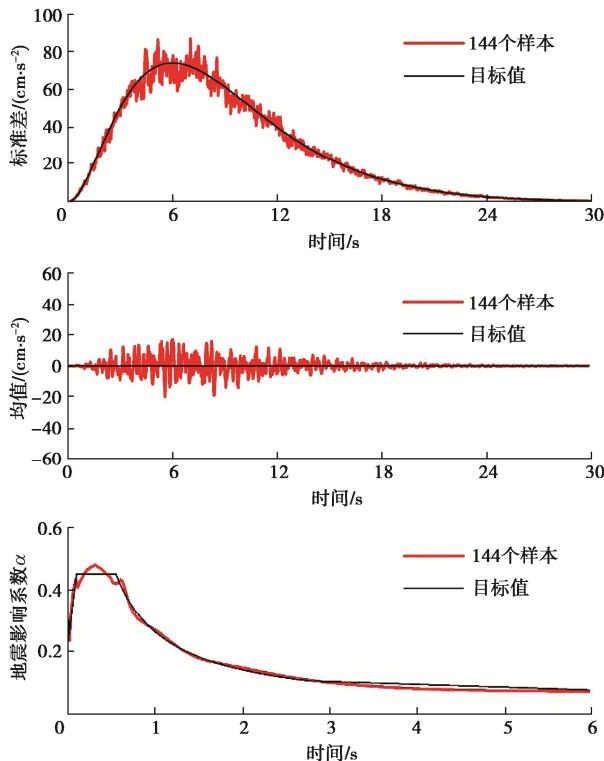


图 1 样本的均值、标准差和反应谱与目标值的对比

Fig. 1 Comparison between mean, standard deviation and response spectrum and target values

3 有限元模型与计算参数

3.1 有限元模型

模型采用场地深度为 10 m, 水平向为 30 m 的砂土地基; 在深度为 1.2 m 处埋设一混凝土管道, 管道外径为 0.6 m, 壁厚为 0.02 m; 地下水位到地表; 有限元网格如图 2 所示。管道与土体的接触面设置了无厚度的 Goodman 单元, 以模拟土体和管线的滑移和张开。Goodman 单元无法传递节点孔压, 因此将接触节点对的孔隙水压力自由度绑定, 以达到可以自由透水的目的。地基底部为刚性边界, 两侧自由边界将左右边界相同标高的节点平移自由度进行绑定使其水平位

移和垂直位移同步, 可以模拟地基的水平剪切变形和沉降, 其工作原理与剪切箱类似, 土体表面孔隙水压力为 0。地震波作为剪切波由土层底部的刚性边界输入。同时本文还研究了 U 型排水措施对管道上浮的减灾效果, 排水碎石布置如图 3 所示。

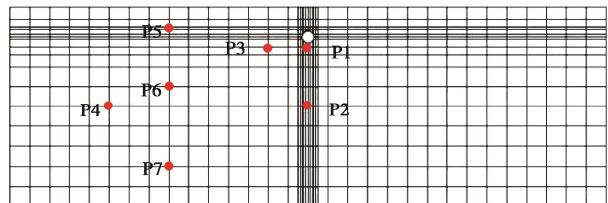


图 2 有限元网格及观测节点位置

Fig. 2 Finite element mesh and position of observation nodes

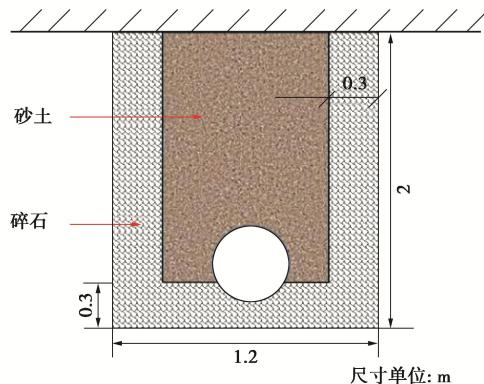


图 3 U 型碎石排水措施

Fig. 3 Drainage measures for U-shaped gravel

本次研究中, 单元均采用四边形 4 节点流固耦合单元, 划分单元数为 660, 节点数为 724, 采用大连理工大学抗震研究所自主开发的基于 CPU+GPU 并行的动力有限元非线性分析软件 GEODYNA, 采用 AMD Ryzen 7 处理器 CPU, 8G 内存的笔记本电脑进行计算, 单个样本计算耗时 10 min 左右。

3.2 材料本构模型选择和计算参数

砂土地基采用广义塑性模型^[17], 该模型能很好地用于黏土、砂土、粗粒土等多种土体的本构计算, 而且经过大量实例验证, P-Z 模型能很好地模拟地震作用下的孔隙水压力累积^[18-19], 参数如表 1 所示; 排水碎石同样采用广义塑性模型, 参数如表 2 所示。其中 G_0 为弹性剪切模量系数, K_0 为弹性体积模量系数, M_g 为临界状态线在 $p'-q$ 平面上的斜率, H_{u0} 和 H_{l0} 均为塑性模量参数, α_f , α_g , β_0 , β_1 , γ_{DM} , γ_u 均为无量纲的模型参数^[20]。

接触面采用理想弹塑性接触面, 参数如表 3 所示, 其中 K_n 为接触面单元的法向刚度; K_s 为接触面单元的切向刚度; φ 为摩擦角; c 为凝聚力; t 为抗拉强度。

埋地管道采用弹性混凝土进行模拟,参数如表 4 所示,其中 E 为弹性模量; μ 为泊松比; ρ 为密度。

表 1 砂土模型参数

Table 1 Parameters of sand

G_0	K_0	M_g	M_f	α_f	α_g
95.8	192.5	1.15	1.03	0.45	0.45
H_{u0}	H_{l0}	β_0	β_1	γ_{DM}	γ_u
800	600	4.2	0.2	0	2

表 2 排水碎石模型参数

Table 2 Parameters of drainage crushed stone

G_0	K_0	M_g	M_f	α_f	α_g
217	500	1.32	1.30	0.45	0.45
H_{u0}	H_{l0}	β_0	β_1	γ_{DM}	γ_{DM}
4000	750	4.2	0.2	4	2

表 3 理想弹塑性接触面参数

Table 3 Parameters of ideal elastic-plastic contact surface

K_n/MPa	K_s/MPa	$\phi/(^\circ)$	c	t
1000	10	23	0	0

表 4 弹性混凝土参数

Table 4 Parameters of elastic concrete

E/MPa	μ	$\rho/(kg\cdot m^{-3})$
25500	0.167	23

4 计算结果分析

在地震作用下, 场地孔隙水压力升高, 土体有效应力逐渐降低, 从而导致土壤液化是管道上浮的主要原因。因此选定超孔隙水压力、场地加速度、上浮位移 3 个指标来分析埋地管道的上浮机理和响应特征; 使用概率分析方法, 得到了上浮位移的概率信息并对其进行可靠度评价; 探究了 U 型碎石排水措施的抗上浮机理和效果。

4.1 超孔隙水压力

图 4 展示了代表性地震动(11号地震动)作用下震动结束时刻场地的超孔隙水压力。震动结束时刻整个场地孔隙水压力显著增大, 坚向到下逐渐增大。由于土-结构的相互作用, 管道正下方土体的孔压小于等深处远场的孔压, 将导致产生远场向管道下部的渗流压力, 这也是导致管道上浮的原因之一。

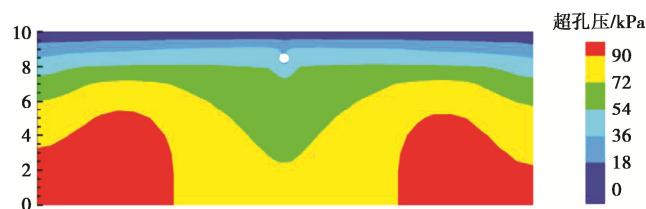


图 4 超孔隙水压力分布

Fig. 4 Distribution of excess pore water pressure

为了进一步研究场地的响应特征, 选取了 8 个观测节点, 如图 2 所示。P1、P2、P3、P4 四个节点主要用于观测孔压的发展。P1 和 P2 节点可以对比垂直方向孔压的发展; P1 和 P3 以及 P2 和 P4 的对比可以揭示远、近场和管底超孔压的发展, P5、P6、P7 主要用于观测地震作用下土体中加速度的传播。

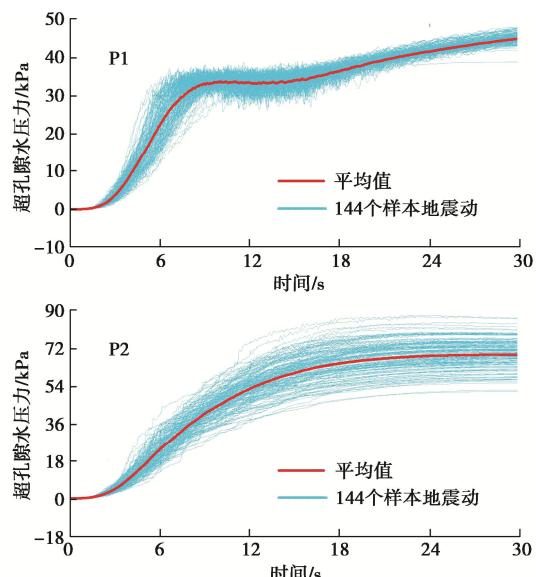
在 144 个随机地震动作用下, 各节点超孔隙水压力响应变化幅度较大, 说明地震动随机性对液化土壤的动力响应有显著影响, 因此从随机动力角度分析其时程是具有工程意义的。如图 5 所示, 在地震作用下, 超孔隙水压力瞬时产生, 并持续上升, 达到顶峰后, 即保持相对稳定, 但管底 P1 点超孔压在稳定后仍有少量增加, 这是因为 P1 的超孔压在约 8 s 时即保持相对稳定, 但与其等深处 P3 的超孔压却在持续增长, 进而增大了水头差, 最终导致持续增强的渗流压力。并且, 浅层土壤孔隙水压力增长迅速, 且较早达到稳定; 深层土壤的孔隙水压力到达稳定所需时间更长, 最终稳定值更大, 与图 4 相符, 深层土壤相较于浅层土壤的初始有效应力更大, 液化更缓慢。综上, 土体液化自上而下发展, 且液化程度逐渐降低。

为进一步研究地震作用下土壤液化的发展过程, 本文定义孔压比以识别土壤液化程度:

$$\gamma_u = \frac{u_{excess}}{\sigma'} \quad (16)$$

式中: γ_u 为孔压比; u_{excess} 为超孔隙水压力; σ' 为初始有效应力。当 $\gamma_u \geq 1$ 时, 认为该处土壤完全液化。

图 6 为 11 号地震动作用 12.5, 30 s 时刻场地孔压比分布, 随着时间的增加, 液化区逐渐向下发展, 液化程度由地表向地下逐渐减弱, 该结论与上述分析一致; 地震结束时刻, 地表 2 m 内及管道四周土体孔压比均大于 1, 已完全液化, 管道液化的发展进而引起了管道的上浮位移。



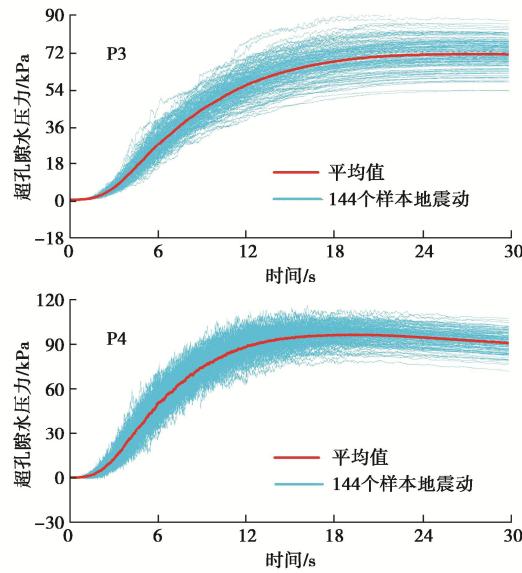
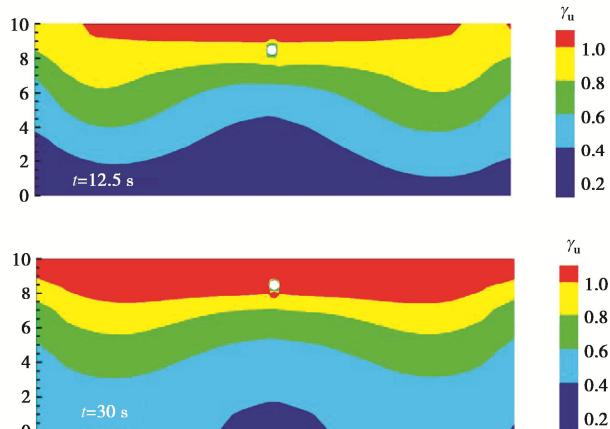


图 5 特征节点超孔压时程

Fig. 5 Time histories of excess pore pressure at characteristic nodes

图 6 $t=12.5$ s 和 $t=30$ s 时刻孔压比分布Fig. 6 Distribution of pore pressure ratio at $t=12.5$ and 30 s

4.2 场地加速度

图 7 为第 11 条随机地震作用下特征节点的加速度响应, 节点位置如图 2 所示。由于本文采用的地震峰值强度较小 ($0.2g$), 因此在地震作用初期, 砂土对地震起放大作用, 且随着埋深的减少加速度放大倍数逐渐增加; 随着地震动持续时间的增加, 孔隙水压力进一步累积, 土体液化和非线性持续发展, 液化砂土的滤波作用使地震波中的高频分量难以传递, 加速度放大效应显著减小, 与振动台试验结果相符^[21]。在实际工程中, 针对强度较小地震作用下埋地管道的抗震设计要注意地基对地震加速度的放大效应。

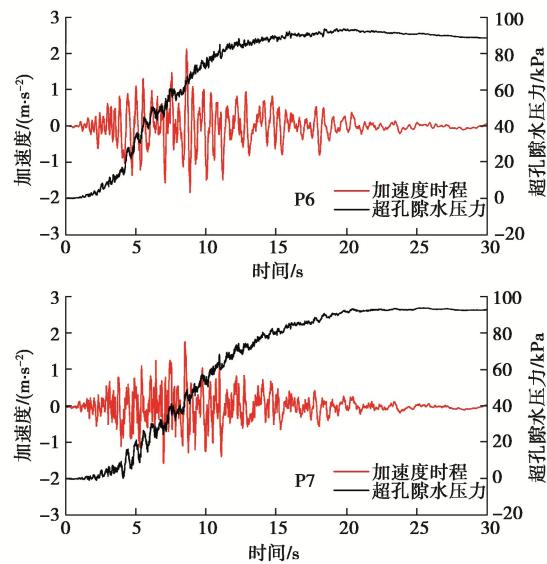
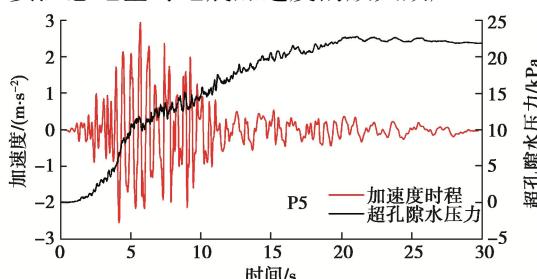
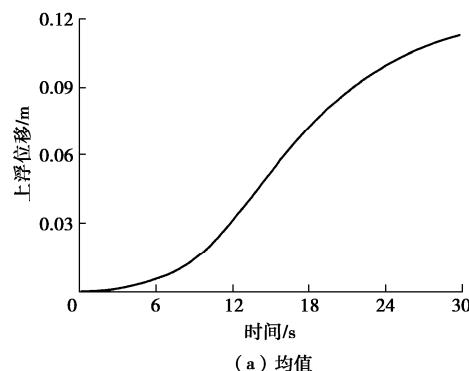


图 7 特征节点加速度时程和超孔压

Fig. 7 Time histories of acceleration and excess pore water pressure at feature nodes

4.3 结构位移变形分析

图 8 为 144 个样本地震作用下管道的平均上浮位移和标准差, 上浮位移随时间逐渐增加, 呈现出渐进过程; 标准差曲线呈单调递增趋势, 表明结构非线性的发展。图 9 为管道底部 (P1 特征节点位置) 的位移响应时程。管道的上浮位移受地震随机性影响很大, 最大值达到 0.18 m, 而最小值仅为 0.01 m。因此, 采用单一地震激励的方法容易低估其上浮位移, 导致预料之外的灾害。在地震作用初期, 地震输入的能量较少, 且大部分能量用于破坏砂土固有结构, 故早期孔隙水压力上升较慢, 管道也只发生少量的上浮位移, 随着地震能量的持续输入, 管底超孔压达到相对稳定 (即土壤完全液化), 砂土有效应力完全丧失, 管道以近乎线性的方式持续上升, 因此砂土液化是管道上浮的主要原因。图 10 为 11 号地震作用下的场地位移矢量图, 砂土的位移在管道两侧形成了较宽的环形, 两侧土体向管道下部运动, 进一步加剧了管道的抬升; 上覆土体由于管道的上浮运动而被推向两侧。这种运动可以归因于在等深处, 管道两侧的孔隙水压力大于管线底部的孔隙水压力, 从而存在一个水力梯度, 在渗流压力的作用下, 土颗粒向管道下部运动。



(a) 均值

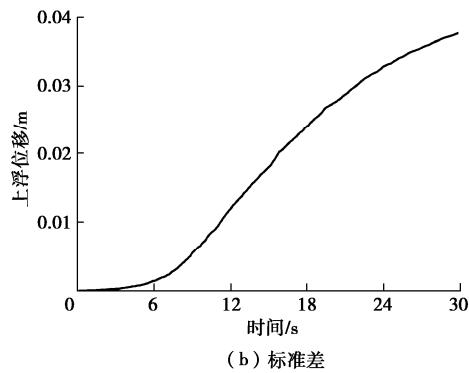


图 8 上浮位移的均值和标准差

Fig. 8 Time histories of mean and standard deviation of upward displacement

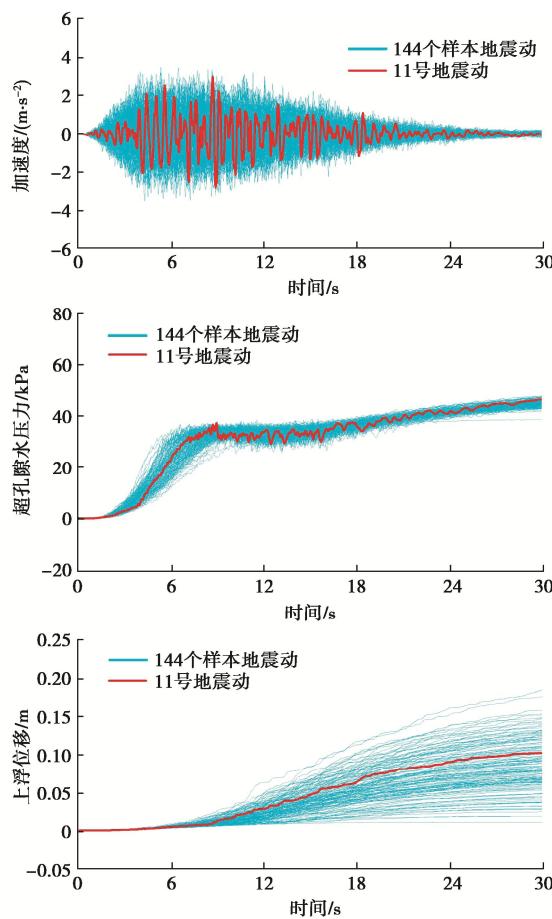


图 9 管道底部的加速度、超孔压和上浮位移时程

Fig. 9 Time histories of acceleration, excess pore water pressure and buoyancy at bottom of pipe

基于概率密度演化法, 得到了管道上浮位移的概率密度信息, 图 11 (a) 描述了概率密度曲线随时间的变化过程, 可以看出, 上浮位移的概率分布具有极强的变异性, 随着时间涨落和演化, 在曲面的轮廓(图 11 (b))上体现的更加明显, 说明在随机地震影响下, 概率信息的演化和传递是不规则的且复杂的, 证明了地震动随机性对管道地震响应的显著影响。基于等效

极值事件, 得到了上浮位移极值的概率密度函数和累积分布函数, 如图 12, 其分布规律符合均值和方差曲线。基于性能的抗震设计理念, 提出了 0.045 m (轻度破坏), 0.075 m (中度破坏), 0.110 m (重度破坏) 三个界限值, 其对应可靠度如表 5 所示。

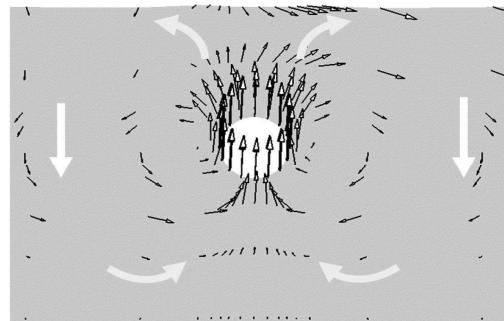


图 10 位移向量示意图

Fig. 10 Schematic diagram of displacement vector

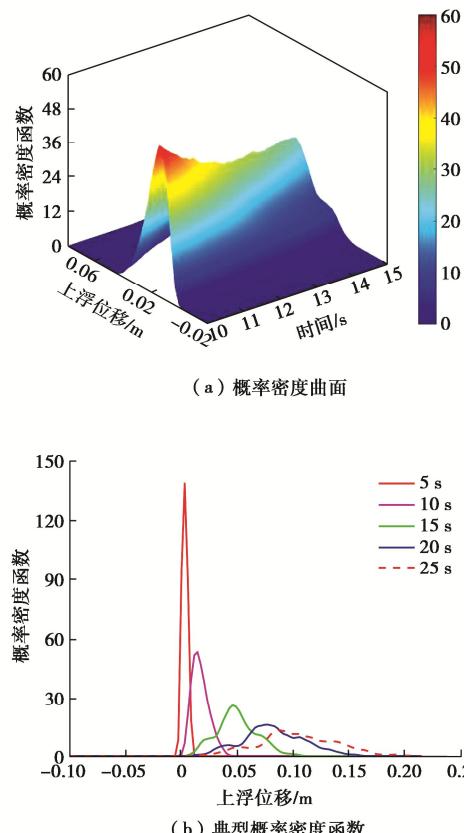


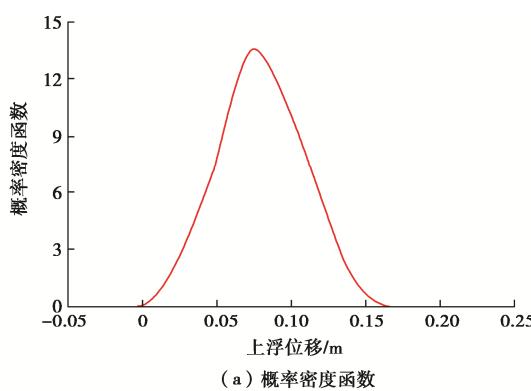
图 11 上浮位移的概率密度信息

Fig. 11 Probability densities of upward displacement

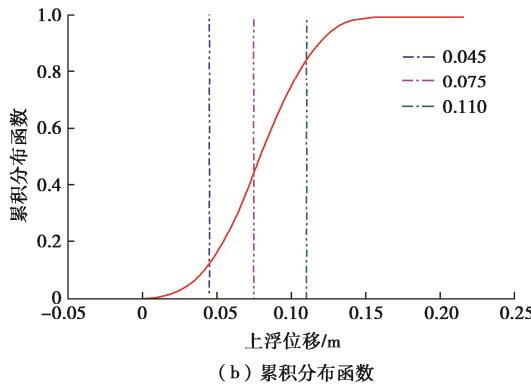
表 5 不同破坏等级的可靠度

Table 5 Reliabilities of different failure grades

性能水平	破坏等级		
	轻度破坏	中度破坏	重度破坏
上浮位移/m	0.045	0.075	0.110
可靠度/%	88.22	56.35	16.23



(a) 概率密度函数



(b) 累积分布函数

图 12 上浮位移的等价极值概率信息

Fig. 12 Equivalent extremum probability information of upward displacement

4.4 U型碎石排水措施抗上浮效果分析

本文在管道周围增设 U型碎石排水措施后(图 3)采用同样的随机地震激励, 进行了 144 次动力有限元计算。图 13 展示了场地超孔隙水压力在震后时刻的分布, 可以看出, 碎石排水层附近超孔压下降明显, 超孔压分布云图成“凹”字型, 场地整体的超孔压有所下降。图 14 为管底的超孔压时程和对比, 设置碎石排水措施后, 超孔压的增长过程变化更为剧烈, 但数值上升不明显且一直处于较低的水平, 说明排水效果良好。图 15 为管道上浮位移时程和对比, 可以看出, 管道的上浮规律有所变化, 表现为先上升后沉降, 在地震过程中, 最大只发生 0.005 m 上浮, 抗上浮效果良好。

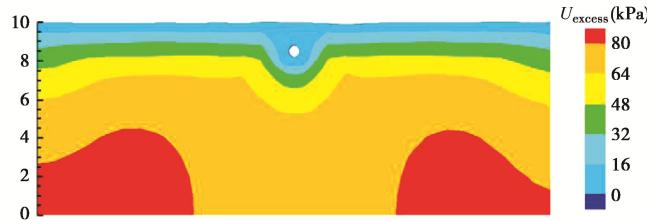


图 13 U型碎石排水震后超孔隙水压力分布

Fig. 13 Distribution of excess pore water pressure at post-earthquake time of U-shaped gravel drainage measures

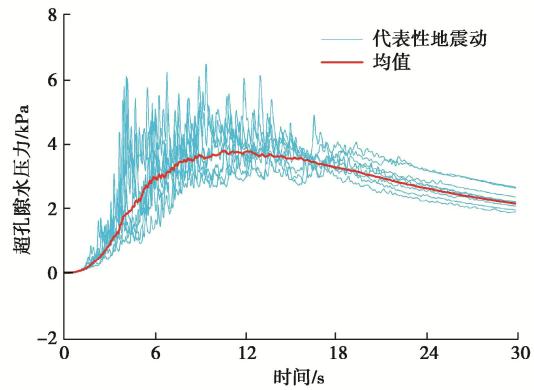


图 14 管道底部平均超孔压时程

Fig. 14 Comparison of time history of average excess pore water pressure at bottom of pipe

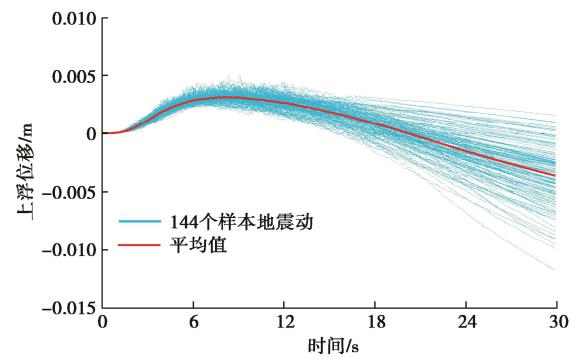


图 15 上浮位移时程

Fig. 15 Comparison of time history of mean upward displacement

基于等价极值分布理论, 可以得到增设排水措施后管道上浮位移极值的累积分布函数, 如图 16 所示。设置排水措施后的管道动力可靠度得到了较大的提升, 甚至未达到本文定义的轻度破坏状态, 进一步验证了 U型碎石排水措施良好的抗上浮效果。

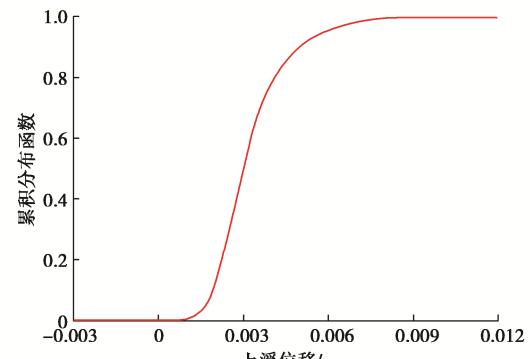


图 16 累积分布函数

Fig. 16 Cumulative distribution function

5 结论

本文考虑地震动的随机性和非平稳性, 结合随机地震动模型和概率密度演化法, 从随机和概率的角度

深入研究了液化场地下埋地管道的成灾机理和可靠度水平, 得到以下 4 点结论。

(1) 本文采用谱表示-随机函数法构造出一系列非平稳随机地震动, 采用概率密度演化法将随机分析转化为了系列确定性时程分析, 从概率和统计的角度对埋地管道的上浮机理和可靠度给出了较为准确的评价, 经验证该方法可以广泛地应用于非线性结构的随机动力分析和可靠度评价。

(2) 随机动力分析结果表明, 在地震动作用下, 孔隙水压力上升导致土壤液化是引起管道上浮的主要原因, 管道两侧土壤的运动以及水头差引起的渗流压力进一步加剧了管道的上浮; 较为全面地探究了埋地管道的成灾机理, 可以为液化土壤中埋地管道的抗震设计提供一定参考。

(3) 概率分析和随机响应分析结果表明, 地震动的随机性对埋地管道的动力响应和概率分布有显著影响, 单一地震动分析很难准确估计管道的性能水平, 不符合工程实际。为确保管道的抗震安全, 进行管道抗震性能评估时考虑地震动的随机性十分必要。

(4) 采用概率分析方法, 初步划分了埋地管道的可靠度等级。增设 U 型碎石排水措施后, 极大降低了管道周围超孔隙水压力, 防止管道周围土壤发生液化, 从而大大提高了管道的可靠度水平, 防灾效果良好。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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**(增刊1): 205-209. (LU Hongqian, HAN Hui, ZHU Yongqiang, 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))
- [4] SAEEDZADEH R, HATAF N. Uplift response of buried pipelines in saturated sand deposit under earthquake loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, **31**(10): 1378-1384.
- [5] 邹德高, 孔宪京. 液化土中管线抗上浮排水措施数值分析[J]. 大连理工大学学报, 2010, **50**(3): 379-385. (ZOU Degao, KONG Xianjing. Numerical analysis of mitigation methods against pipeline up-lifting in liquefiable soil[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, **50**(3): 379-385. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] 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 Tiejun, WANG Qianxin. Seismic response of underground pipelines to ground motion with spatial randomness[J]. Engineering Mechanics, 2003, **20**(3): 120-124. (in Chinese))
- [8] PANG R, ZHOU Y, CHEN G H, et al. Stochastic mainshock-aftershock simulation and its applications in dynamic reliability of structural systems via DPIM[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2023, **149**(1): 04022096.
- [9] 刘汉龙. 随机地震作用下地基及土石坝永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 19-27. (LIU Hanlong. Permanent deformation of foundation and embankment dam due to stochastic seismic excitation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 19-27. (in Chinese))
- [10] ZHOU Y, JING M Y, PANG R, et al. A novel method for the dynamic reliability analysis of slopes considering dependent random parameters via the direct probability integral method[J]. Structures, 2022, **43**: 1732-1749.
- [11] LI J, CHEN J B, FAN W L. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability[J]. Structural Safety, 2007, **29**(2): 112-131.
- [12] PANG R, XU B, ZHOU Y, et al. Seismic time-history response and system reliability analysis of slopes considering uncertainty of multi-parameters and earthquake excitations[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **136**: 104245.
- [13] 孔宪京, 庞锐, 徐斌, 等. 考虑堆石料软化的坝坡随机地震动力稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 414-421. (KONG Xianjing, PANG Rui, XU Bin, et al. Stochastic seismic stability analysis of dam slopes considering softening of rockfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 414-421. (in Chinese))
- [14] 李杰, 陈建兵. 随机结构动力反应分析的概率密度演化方法[J]. 力学学报, 2003, **35**(4): 437-442. (LI Jie, CHEN Jianbing. Probability density evolution method for analysis of stochastic structural dynamic response[J]. Acta Mechanica

- Sinica, 2003, **35**(4): 437-442. (in Chinese))
- [15] 梁建文. 非平稳地震动过程模拟方法(I)[J]. 地震学报, 2005, **27**(2): 213-224. (LIANG Jianwen. Simulation of non stationary ground motion processes (I)[J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, **27**(2): 213-224. (in Chinese))
- [16] DEODATIS G. Non-stationary stochastic vector processes: seismic ground motion applications[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1996, **11**(3): 149-167.
- [17] PASTOR M, ZIENKIEWICZ O C, CHAN A H C. Generalized plasticity and the modelling of soil behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1990, **14**(3): 151-190.
- [18] GHOSH B, MADABHUSHI S P G. A numerical investigation into effects of single and multiple frequency earthquake motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, **23**(8): 691-704.
- [19] DEWOOLKAR M M, KO H Y, PAK R Y S. Seismic behavior of cantilever retaining walls with liquefiable backfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(5): 424-435.
- [20] ZOU D G, XU B, KONG X J, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **49**: 111-122.
- [21] 李培振, 任红梅, 吕西林, 等. 液化地基自由场振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, **28**(2): 171-178. (LI Peizhen, REN Hongmei, LÜ Xilin, et al. Shaking table test on free field considering soil liquefaction[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, **28**(2): 171-178. (in Chinese))

2024 年第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术研讨会征文通知（一号通知）

第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会以“长大隧道工程挑战与技术创新”为主题，将于2024年8月在新疆乌鲁木齐举行，会议将围绕水利、交通、矿山、市政等行业的热点问题进行交流，旨在继续为海峡两岸隧道与地下工程领域的学者和工程师搭建一个高品质的学术交流平台，推动隧道与地下工程领域重要问题进行深入研究，分享最新的观点和最前沿的研究成果，欢迎各界同仁积极投稿。

一、会议时间、地点

时间：2024年8月，地点：新疆乌鲁木齐。

二、会议主题

长大隧道工程挑战与技术创新

三、会议内容

①长大隧道掘进机施工信息化与智能化技术；②隧道岩爆、大变形与突水突泥等重大地质灾害防控技术；③强震区隧道工程抗减震技术；④超长跨海隧道建设与数字化管养关键技术；⑤城市更新与地下空间开发利用；⑥国内外典型地下工程案例分析。

四、组织机构

主办单位：中国岩石力学与工程学会地下工程分会，中国土木工程学会隧道及地下工程分会；台湾隧道协会。

五、会议征文

①应征论文须是原创的、尚未公开发表的论文，中英文均可，请作者分别参照《岩土力学》和《隧道与地下工程灾害防治》论文的格式撰写投稿。②拟投稿论文请以“题目-单位-姓名”为主题投稿至《岩土力学》或《隧道与地下工程灾害防治》编辑部，并标注“2024 年第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会投稿”。③投稿截止日期：2024 年 2 月 29 日。

六、联系方式

袁敬强 13871173207，杨云 13545026200。邮箱：dxgcjh2023@163.com。《岩土力学》投稿网址：<http://ytlx.whrsm.ac.cn/CN/1000-7598/home.shtml>。《隧道与地下工程灾害防治》投稿网址：<http://tunnel.sdujournals.com/CN/column/column2.shtml>。

（中国岩石力学与工程学会地下工程分会 供稿）