

DOI: 10.11779/CJGE20231079

典型交叉连接形式的承插式埋地管线地震响应分析

侯本伟, 刘嘉伟, 张亚波, 韩俊艳, 钟紫蓝*, 杜修力

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 埋地管线的接口类型以及管线交叉连接形式, 对管线结构地震响应造成较大影响。由于管线交叉处的受力和变形特征受到各分肢管线结构类型的影响, 首先建立分肢直线型管线有限元模型, 分析了地震波作用下柔性接口球墨铸铁管线(DIP)和刚性接口灰口铸铁管线(CIP)的接口张开量以及管土相对变位; 然后分析了采用十字型、T型、L型和双T型交叉管件连接的管线地震响应特征, 其中交叉管件与各分肢管线分别采用承插式和法兰式两种连接口, 并比较了接口类型对各类交叉管件地震响应的影响规律。结果表明: 对于地震波作用下不同接口类型的直线型管线, DIP柔性接口峰值张开量大于CIP刚性接口, CIP刚性接口管线轴力远大于DIP柔性接口管线。管线交叉处采用承插式接口时, 双T型交叉管件连接的管线接口峰值张开量略小于十字型、T型连接。管线交叉处采用法兰接口时, 与法兰口邻接的DIP柔性接口张开量较大、易发生拉伸破坏, 与法兰口邻接的CIP刚性接口轴向压力较大、易发生受压破坏; 在双T型交叉处, 与法兰口邻接的承插接口响应显著大于十字型、T型连接。

关键词: 埋地管线; 交叉管线; 地震波动; 承插式接口; 法兰接口; 接口变形

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)02-0407-10

作者简介: 侯本伟(1984—), 男, 副教授, 主要从事生命线地震工程方面的研究工作。E-mail: benweihou@bjut.edu.cn。

Seismic response of buried socket pipelines with typical cross connections

HOU Benwei, LIU Jiawei, ZHANG Yabo, HAN Junyan, ZHONG Zilan, DU Xiuli

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing

100124, China)

Abstract: The joint type and cross connection pattern of buried pipelines have a significant impact on the seismic responses of pipeline structures. As the seismic deformation and stress of pipeline cross are determined by the structural types of branch pipelines, a finite element model for straight branch pipelines is firstly established to investigate the joint displacement and relative pipe-soil displacement of ductile iron pipelines (DIP) with flexible socket rubber joints and cast iron pipelines (CIP) with rigid joints under seismic wave propagation. Then, the seismic responses of pipeline connections using cross-shaped, T-shaped, L-shaped and double-T-shaped cross connections are analyzed, where the pipe cross is connected to the branch pipelines using the socket or flange joints. Furthermore, the effects of joint types on the seismic responses of pipeline cross connections are evaluated. The results show that for the straight pipelines with different types of joints, the peak joint displacement of the DIP with flexible joints is larger than that of the CIP with rigid joints. When the pipe cross is connected with the socket joints, the peak joint displacement of the pipelines with double-T-shaped cross is slightly smaller than that of the pipelines with cross-shaped and T-shaped connections. When the pipe cross is connected using the flange joints, the DIP with flexible joints adjacent to the flange joints exhibits a larger joint displacement and is prone to tensile failure, while the CIP with rigid joints adjacent to the flange joint experiences greater axial compressive force and is prone to compressive failure. At the cross of double-T-shaped pipelines, the responses of the socket joints adjacent to the flange joints are significantly larger than those of the cross-shaped and T-shaped connections.

Key words: buried pipeline; cross pipeline; seismic wave propagation; socket joint; flange joint; joint deformation

0 引言

城市埋地管网系统包括供水、供气、供热等系列管网, 其管线结构在地震作用下易遭到破坏, 引发一系列次生灾害^[1]。一般情况下, 埋地管线在地震作用下的主要破坏位置包括: 管体破坏、接口破坏以及交

叉连接处破坏, 其中接口和交叉连接破坏最为常见。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978023); 国家重点研发计划项目课题(2022YFC3003603)

收稿日期: 2023-11-05

*通信作者(E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn)

因此, 管线接口形式、交叉管件类型和管线受力类型直接影响埋地管线在地震作用下的力学响应^[2]。

埋地管线可分为 2 类: 连续管线(如焊接接口钢制管线)、分段式管线(如胶圈柔性接口球墨铸铁管线和铅嵌缝刚性接口灰口铸铁管线)。Newmark^[3]假设地震波作用下的管线应变等于其周围土体的应变, 对地震波作用下埋地管线的响应进行分析。此后, 为探讨地震波传播效应对管线的影响, 学者们提出弹性地基梁模型^[4]等不同的有限元模型分析埋地管线响应。

Singhal 等^[5]运用弹性地基梁模型, 通过静力分析方法计算埋地管道的地震响应。Liu 等^[6]分析了埋地管线的非线性随机地震响应。Shi^[7]研究了地震波对埋地承插式铸铁管线的影响, 提出了评估接缝混凝土圆筒承插式管线的轴向接缝拔出运动的简化解析公式。李锦强等^[8]采用简化弹性地基梁模型, 分析了地震行波作用下的管道接口动力响应。侯本伟等^[9]采用弹性地基梁模型分析地震行波作用下考虑土体参数随机的地下管线接口张开响应。

然而, 以上研究大部分仅针对单根直线型管线, 对于实际地下管网结构, 管线之间通过不同交叉形式的管件连接, 如 T 型、L 型、十字型管件等交叉管件。为研究典型交叉管件的影响, Liu 等^[6]进行了含交叉管件的埋地管网全尺寸整体建模, 分析了人工地震试验中的埋地管线响应。Liu 等^[10]、钟紫蓝等^[11]分别研究了不同类型交叉管件处管线接口的地震响应, 其中交叉管件与各肢管线的连接分别采用承插和法兰式接口。

上述针对埋地承插式管线地震响应分析的研究, 均以 DIP 柔性接口管线为对象, 未考虑 CIP 刚性接口管线的响应差异; 此外, 市政主干供水管线的十字交叉处, 实际工程应用中一般采用两个 T 型管件(双 T 型)连接代替, 上述对于交叉管线的研究, 忽略了市

政管线中较为常见的双 T 型管件, 缺少对双 T 型管线地震反应规律和失效模式的研究。

为此, 针对 DIP 柔性接口和 CIP 刚性接口两类承插式管线, 建立了十字型、T 型、L 型和双 T 型 4 类典型交叉管线的 DIP 和 CIP 管线有限元模型, 其中, 交叉管件与各肢管线的连接分别采用承插式和法兰式接口。通过开展对各类管线接口响应、土体与管线节点的相对位移以及管-土摩擦力的分析, 研究不同交叉管件连接以及接口类型对管线地震响应的影响。

1 管线地震响应分析模型

1.1 直管线分析模型

本文建立埋地承插式管线弹性地基梁模型, 模型主要包括: 管段、接口、交叉管件和管-土相互作用弹簧(简称“管-土弹簧”)。由于管线交叉处的受力和变形特征受到各分肢管线结构类型的影响, 首先建立分肢直线型管线有限元模型如图 1 所示。埋地分段式管线, 如球墨铸铁管、灰口铸铁管等, 通过接口将各个管段相连, 接口对管线的约束作用可通过轴向、剪切向和弯曲弹簧建模^[6]。对于承插式接口, 接口横向变形受到承插段管壁的限制, 其剪切向弹簧刚度近似设置为无限大^[10]。

图 2 分别给出了轴向和弯曲弹簧的管线接口简化力学模型, 采用非线性弹簧单元表示承插式接口的非线性力与位移、弯矩与转角的力学关系。球墨铸铁管线柔性接口的力-位移关系采用理想弹塑性模型(图 2 (a)), 相应的参数根据球墨铸铁管线轴向拉伸试验结果进行选取^[11-12]; 普通铸铁管线刚性接口的力-位移关系参考 O'Rourke 等^[1]、侯本伟等^[9]、Rajani 等^[13]所给模型进行描述(图 2 (b), (e)), 采用 Shi^[7]中总结的刚性接口的轴向力-位移数据, 轴力按每环向距离表示为 0.16 kN/mm, 接口轴向弹簧的弹性极限位移为 Δ_e , F_u 为接口渗漏抗拔力, 取值为 $2F_c$, Δ_u 取值为管

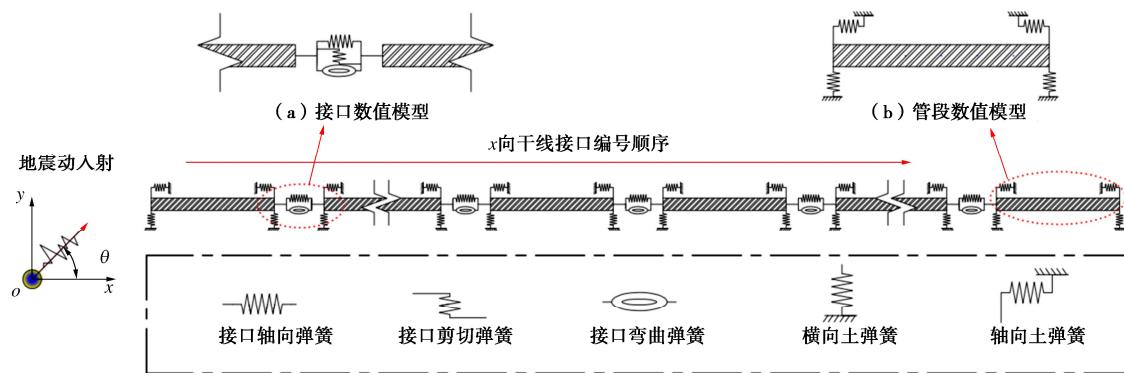


图 1 埋地管线有限元模型示意图

Fig. 1 Illustration of finite element model for buried pipelines

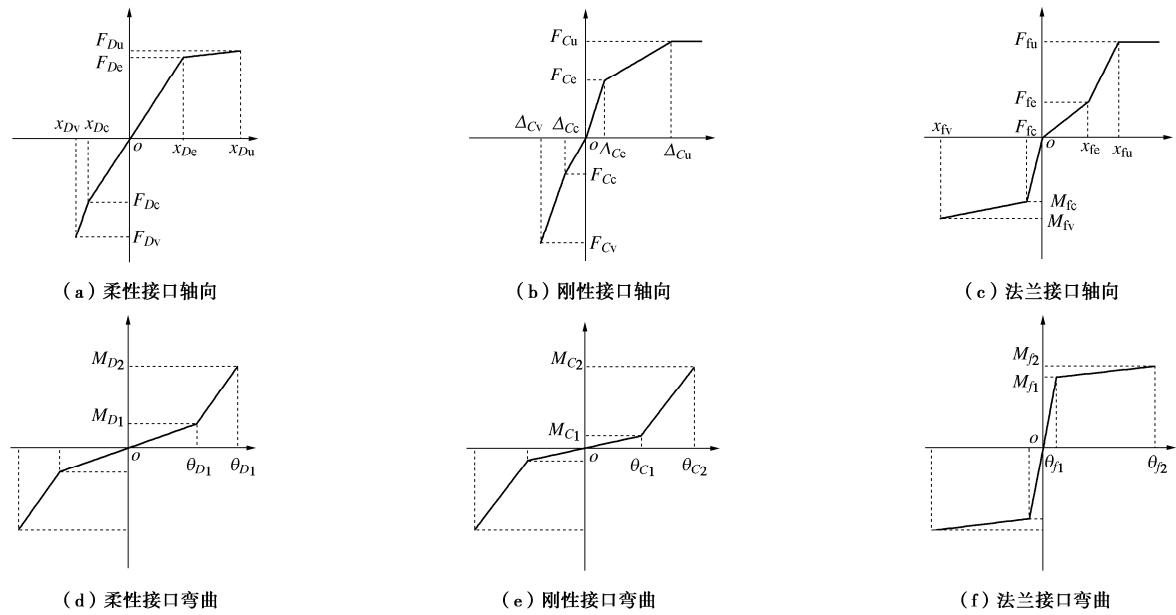


图 2 管线接口弹簧简化力学模型

Fig. 2 Simplified mechanical model for joint spring

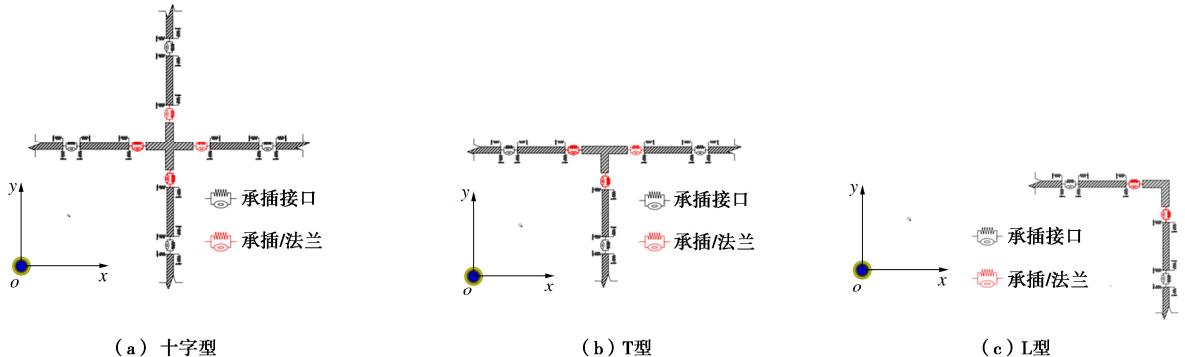


图 3 简单交叉管线分析模型示意图

Fig. 3 Illustration of simple cross-pipeline analysis models

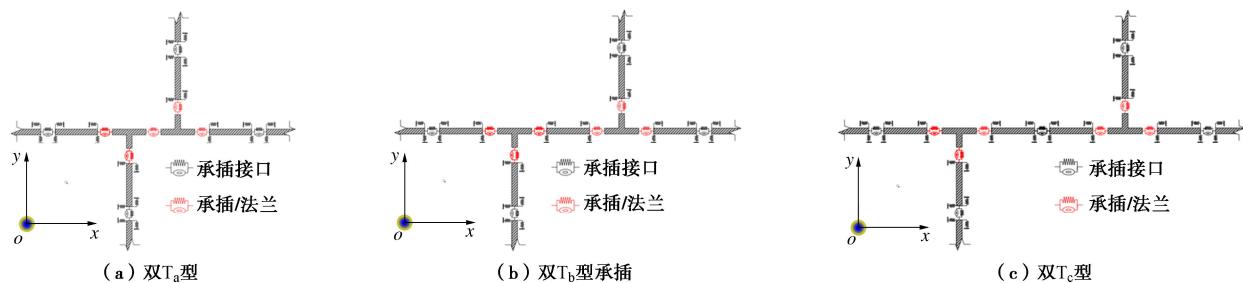


图 4 双 T 型交叉管线数值模型示意图

Fig. 4 Illustration of double T-cross pipeline analysis models

线承插深度 d_p 的 45%; 法兰接口力学模型参照钟紫蓝等^[11]取值, 接口轴向力-位移、接口弯矩-相对转角均为线性关系(图 2 (c), (f))。

1.2 交叉管件分析模型

考虑到埋地分段管线通常由不同形状的交叉管件进行连接, 如十字型、T型以及L型, 且由于主干管与支管在交驻处的约束的影响, 交叉管件处的响应规律与直管线有一定差异。因此, 参考 Liu 等^[10]的建模

方法, 将交叉管件作为一个整体组件(各肢长度 0.2 m), 如图 3 所示。且考虑到交叉管件处与各肢管线连接方式的多样性, 接口形式分为法兰接口及承插式接口两类。除交叉管件处的连接外, 各肢管线的管段均采用承插式接口连接。

同时, 本节建立了实际管线工程中常用的双 T型交叉管线分析模型。双 T型管件之间连接一般不超过 3 个管段, 交叉管件的影响范围一般在其邻近的 2 个

管段接口^[11]。对于双 T 型交叉管线，主要分析两个 T 型管件之间的接口数量、类型对于管线地震响应的影响（图 4）。

1.3 管土相互作用模型

基于美国生命线联盟的埋地管线抗震设计指南^[14]，采用理想弹塑性模型描述管-土弹簧的力-位移关系（图 5）。

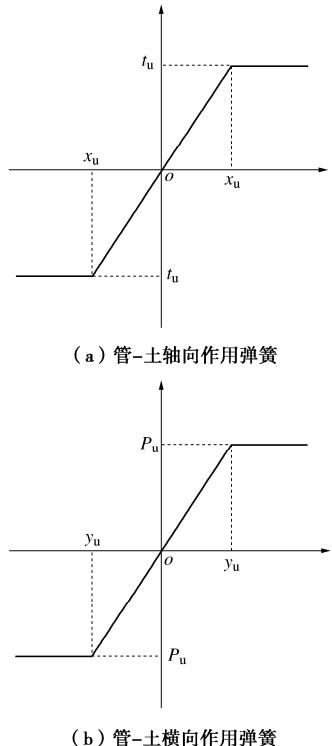


图 5 管土相互作用力学模型

Fig. 5 Mechanical model for pipe-soil interaction

对于管-土轴向弹簧刚度如图 5 (a) 所示，土体极限抗拉位移设为 x_u ，土体传递给单位长度管线的剪切力 t_u 表达式为

$$t_u = \pi D \alpha c + \frac{\pi D}{2} \gamma H (1 + K_0) \tan(f\varphi) \quad (1)$$

式中： D 为管线外径； α 为黏聚系数； c 为黏聚力； H 为管线埋深（管中心到地面）； K_0 为土的静止侧向土压力系数； f 为管与土之间的摩擦系数； γ 为管线上方土体等效重度； φ 为土体摩擦角。

垂直于管线轴向的横向管-土弹簧刚度如图 5 (b) 所示，单位长度上的横向土压力 P_u 的表达式为

$$P_u = \gamma H N_{qh} \quad (2)$$

式中： P_u 为单位长度管线横向（水平）方向的最大土抗力； y_u 为产生最大土抗力时的横向位移； N_{qh} 为土体内摩擦角有关的参数。在管-土相对位移小于 y_u 时线性上升到 P_u ，当管-土相对位移大于 y_u 后，土体传递给单位长度管线的横向力为常数 P_u 。

1.4 地震动输入

本文采用地震动的行波考虑管线沿线非一致地震

动输入的影响，如图 6 所示。

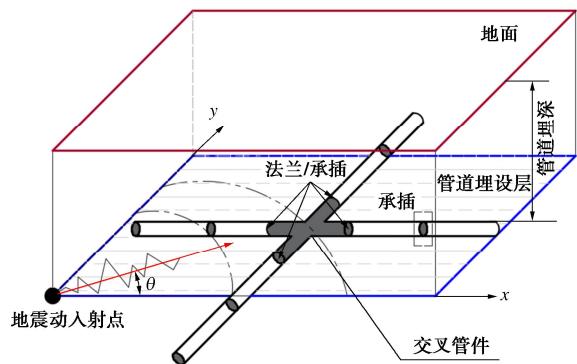


图 6 十字型管线埋设及地震动输入示意图

Fig. 6 Illustration of buried and input of ground motion cross pipeline

假设地震波 $f(t)$ 从坐标原点入射，并与管线结构在同一平面内以球面形式向外传播，夹角为 θ 。在地震动传播过程中，地震波波形和振幅不变，沿地震波传播路径上距离为 ΔX 的两个土体质点振动的加速度、速度和位移时程间均只存在一个时滞 Δt ：

$$\Delta t = \frac{\Delta X}{C_a} \quad (3)$$

式中： C_a 为视波速大小。

以正弦波为例，以 T 为地震动周期，地震动频率为 $\omega = 2\pi/T$ ，对应输入地震动速度时程为

$$v_g(x, t) = -v_A \cdot \cos(\omega t - x/C_a) \quad (4)$$

式中： v_A 为土体振动速度幅值。对速度时程进行积分后，该时刻地震动位移计算公式为

$$u_g(x, t) = \frac{v_A}{\omega} \cdot \sin(\omega t - x/C_a) \quad (5)$$

最后，将生成的地震动位移再沿 x 向、 y 向分解，即可得到地震动输入点的地震动位移时程。

2 管线接口响应分析

根据第 1 节所描述的建模方法，建立简单直线型管线分析模型、十字型、L 型、T 型和双 T 型交叉管线，比较地震波作用下不同接口类型的响应结果。本文所研究管线分为胶圈柔性接口球墨铸铁管线（DIP）和铅嵌缝刚性接口铸铁管线（CIP），公称管径为 DN200，管线埋设深度为 2 m，接口参数的取值见表 1。

场地土体参数见表 2，为减少模型远端边界效应的影响，且考虑到输入正弦波地震动的波长，本研究选取直线型管线数值分析模型的长度为 1050 m，交叉管线数值分析模型的干线和支线长度均为 150 m，每

表1 接口模型参数^[9, 11]
Table 1 Parameters of pipelines and joints^[9, 11]

胶圈柔性接口(DIP)						铅嵌缝刚性接口(CIP)					
公称 直径/ mm	接口拉伸 极限强度 F_{D_e}/kN	接口极限强 度对应位移 x_{D_e}/mm	弹性阶段 峰值压力 F_{D_e}/kN	弹性阶段 段压缩最 大深度 x_{D_e}/mm	公称 直径/ mm	弹性阶段 峰值轴力 F_{C_e}/kN	初始滑移 位移 Δ_{C_e}/mm	接口渗漏 抗拔力 F_{C_u}/kN	接口渗漏 位移 Δ_{C_u}/mm	峰值 压力 F_{C_v}/kN	压缩最大 深度 Δ_{C_v}/mm
200	11.60	11.0	10.54	10.0	200	112.60	1.0	225.20	40.05	1000	12

根管段长度为 6 m, 由 6 个长度为 1 m 的梁单元离散, 管线接口弹簧设定长度为 0.01 m; 为便于比较交叉管线各肢管线响应差异, 将水平 x 向管线定义为干线, 水平 y 向管线定义为支线。定义管线交叉处对接口响应的影响系数 λ 为交叉管件处的承插接口峰值张开量与直线型管线接口峰值张开量的比值, 即

$$\lambda = \frac{J_{D_e}}{J_{D_s}} \quad . \quad (6)$$

式中: J_{D_s} 为直线型管线接口峰值张开量; J_{D_e} 为交叉管件邻接的承插式接口的峰值张开量, 当交叉管件与各肢管线连接为法兰接口时, 该项为与法兰接口邻接的承插式接口的峰值张开量。

地震动输入与管线轴线夹角 $\theta=0^\circ$ 时, 由于管线整体结构与所输入地震动传播方向之间的非对称性, 交叉管线各肢管线的接口响应也随之增大。此时, 在管线交叉管件处的接口响应也更加容易达到安全限值。本文拟采用夹角 $\theta=0^\circ$, 对主干管线输入地震动激励。正弦波地震动速度峰值 $PGV=0.30$ m/s, 周期 $T=3.5$ s, 持时 15 s, 并按照式 (5) 得到对应的地震动位移时程输入到模型中管-土弹簧中的土体节点, 考虑行波效应时视波速 $C_a=300$ /s。

表2 场地参数^[9]Table 2 Parameters of site^[9]

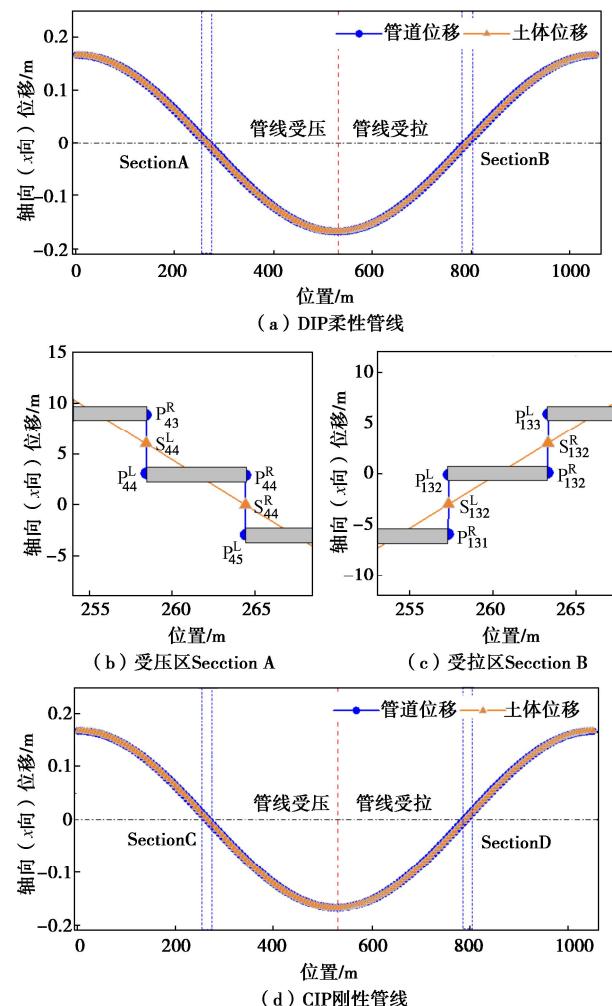
密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	剪切 波速/ ($m \cdot s^{-1}$)	剪切 模量/ MPa	泊松 比	特征 周期/ s	圆频 率/ s^{-1}	内摩 擦角/ ($^\circ$)	黏聚 力/ kPa
1.89	300	180	0.3	0.40	15.708	30	20

2.1 直管线响应

当地震波沿管线轴向传播时, 在数值分析模型(图1)中通过不同位置土体节点轴向位移表示地震动产生的影响, 土体节点与管线节点产生的相对位移差通过管-土弹簧将摩擦力传递给管线, DIP 柔性接口直管线峰值张开量值为 5.81 mm, 与规范公式^[3]计算结果 6 mm 相差约 3.17%, 造成差异的原因在于规范公式方法假定地震动产生的土体变形完全由接口承担, 实际上由于管线接口抗拉刚度和轴向力影响, 部分土体变形由管线变形承担。CIP 刚性接口峰值张开量与 DIP 柔性接口规律基本一致, 接口张开量峰值约为 5.17 mm, 与规范公式计算的接口张开量相差 13.83%。CIP

接口抗拉刚度仍远小于管线本身的抗拉刚度, 管线周围土体的地震动变形主要由管线接口承担。

图 7 展示了代表性时刻直线型管线和土体的位移。其中, 图 7 (a), 7 (d) 分别显示了 DIP 柔性接口、CIP 刚性接口的管段两端节点和土节点的轴向位移。对于受拉状态下的 DIP 柔性接口管线, 借助图 7 (c) 所示的管-土位移可知, 管段两侧土体节点的相对位移 (S_{132}^L, S_{132}^R 相对位移, 6 mm) 由管体变形 (0.19 mm) 及接口变形 (5.81 mm) 共同承担; 由于 DIP 柔性接口刚度远小于管体刚度, 土体变形主要由接口变形吸收, 管体变形很小。对于 CIP 刚性接口管线, 在受拉状态下 (图 7 (f)), 土节点相对位移 (S_{132}^L, S_{132}^R 相对位移, 6 mm) 管体轴向变形 (0.83 mm) 较小, 接口受拉变形较大 (5.17 mm)。



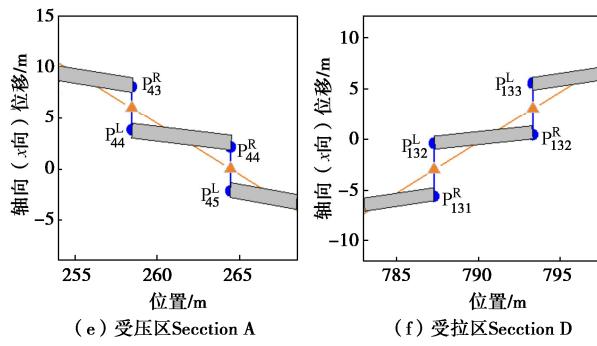


Fig. 7 Displacements of soil and joints of straight pipelines

2.2 简单交叉（十字型、T型、L型）管线响应

（1）交叉管件处采用承插式接口

十字型 DIP 柔性接口管线的沿线接口峰值张开响应规律与 Liu 等^[10]论文中大致相符, 沿管线 x 向 (轴向), 十字型交叉管件处的 2 个接口代替了直管线模型中的 1 个接口, 十字型管件邻接的 2 个接口张开量为直管线接口张开量的一半, 本节模型计算的十字型交叉管件处接口峰值张开量约为 3.05 mm, 其影响系数 $\lambda=0.53$ 。十字型 CIP 刚性接口管线的接口峰值响应规律与 DIP 柔性接口规律略有差异, 十字型交叉管件邻接的接口峰值张开量约为 3.20 mm, 其接口峰值张开量相比于十字型 DIP 柔性接口管线增大了 4.92%, 其影响系数 $\lambda=0.62$ 。

表 3 给出了不同交叉形式的主干管线接口峰值响应。DIP 柔性接口十字、T 型交叉管线接口峰值张开量响应规律与 Liu 等^[10]基本吻合, 其影响系数 $\lambda=0.52, 0.52$ 。对于 DIP 柔性接口交叉管线的接口转角, L 型管线接口转角峰值响应最大 (0.21°), T 型管线次之, 十字型管线峰值转角最小。而对于 CIP 刚性接口十字、T 型交叉管线, 其接口峰值张开量的影响系数分别为 0.69, 0.69; 需要注意的是, CIP 刚性接口 L 型交叉管线在交叉管件邻接接口的转角响应很大, 峰值转角达到 0.65°, 主要原因是 CIP 刚性接口

表 3 简单交叉管线响应汇总（交叉管件连接采用承插式接口）

Table 3 Responses of simple cross pipe (cross pipelines with socket joints)

管线交叉形式	响应类型	胶圈柔性管线 (DIP)		铅嵌缝刚性管线 (CIP)	
		干线	影响系数 λ	干线	影响系数 λ
直管线	张开/mm	5.81	—	5.17	—
	转角/(°)	0	—	0	—
十字型	张开/mm	3.05	0.52	3.55	0.69
	转角/(°)	0	—	0	—
T 型	张开/mm	3.04	0.52	3.55	0.69
	转角/(°)	0.01	—	0.03	—
L 型	张开/mm	1.18	—	0.01	—
	转角/(°)	0.02	—	0.65	—

管线的轴向力较大, 在 L 型交叉处产生了较大的弯矩和转角。

（2）交叉管件处采用法兰接口

将十字、T 型、L 型交叉处各肢管线与交叉管件连接形式替换为法兰连接, 其余各肢管线均采用承插式接口连接。据钟紫蓝等^[11]对法兰接口失效判定, 认为法兰与垫片形成的密封面遭到破坏即发生泄漏;《压力容器》^[16]规定橡胶垫圈密封压缩量 \leq 初始厚度的 1/2, 作为胶圈材料的压缩限值; 法兰接口转角限值 0.3°。图 8 为交叉管线处采用法兰连接时, 管线接口的峰值响应。交叉管线在远离交叉处 2~3 个接口后, 接口峰值变形趋于稳定, 本节分析管线交叉处两端 5 个接口的响应结果。

由于法兰接口刚度较大, 交叉管件两侧邻接的法兰接口轴向变形和转角响应均较小, 但产生了较大的轴向力和弯矩, 并传递给法兰接口邻近的承插式接口。法兰接口的压缩变形比拉伸更为明显, 造成这种情况的原因: 当法兰接口受压时, 接口橡胶圈受压变形较大; 而法兰接口受拉时, 则由螺栓限制了受拉变形。

在十字型、T 型交叉处, DIP 柔性接口交叉管线的法兰接口峰值压缩量为 0.52 mm, 而橡胶垫片安全可压缩量为 0.78 mm^[11], 法兰接口处于安全状态; 而 CIP 刚性接口交叉管线的法兰接口峰值压缩量达 1.84 mm, 法兰接口受压失效。受到交叉处的轴向力和弯矩的影响, 法兰接口邻接的承插式接口均产生较大的变形, 由于 CIP 刚性接口刚度较大, CIP 刚性接口变形突变量小于 DIP 管线, 表 4 比较 了简单交叉 (含法兰) 管线接口响应及影响系数。

2.3 双 T 型交叉管线接口响应

本节首先选用 DIP 柔性接口交叉管线, 比较双 T 型 (图 4, 双 T_a 型、双 T_b 型以及双 T_c 型) 与十字型、T 型交叉管线地震响应的差异; 之后, 比较 3 种双 T 型交叉连接方式 (图 4) 对管线响应的影响。

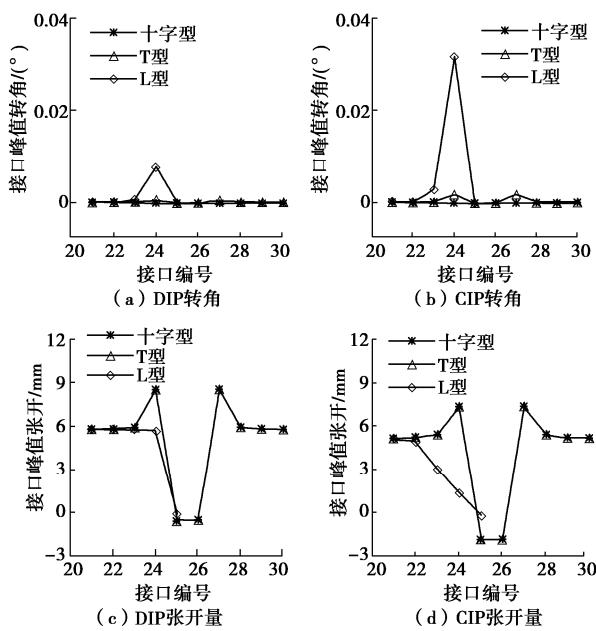


图 8 简单交叉(含法兰)管线接口峰值转角及张开量

Fig. 8 Peak angles and joint deformations of simple cross flanged pipelines

(1) 交叉处采用承插式接口

当双 T 型交叉处接口类型均为承插式接口时, 3 类双 T 型交叉管线的接口峰值变形如图 9 所示。双 T_a ,

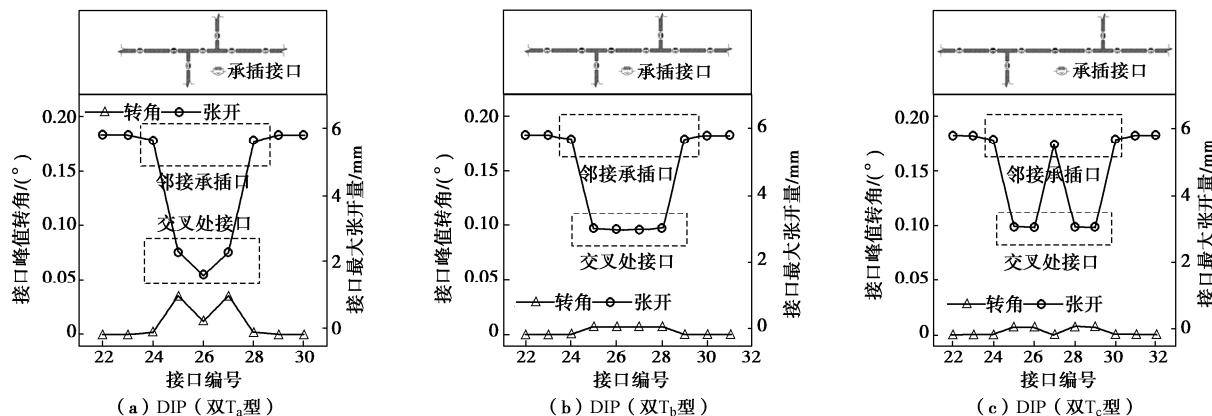


图 9 3类双 T 型交叉管线的接口轴向峰值响应(交叉管件处采用承插式接口)

Fig. 9 Peak seismic response of double T-cross pipelines (cross pipelines with socket joints)

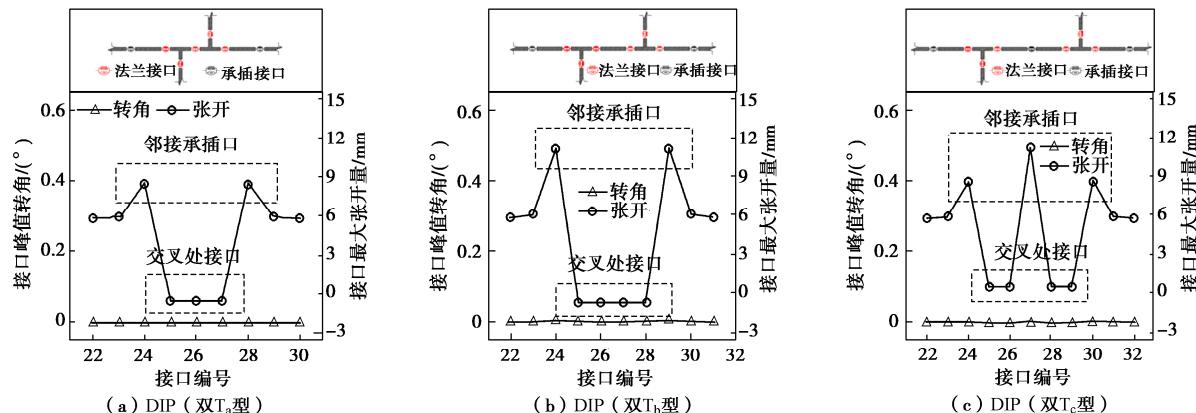


图 10 3类双 T 型交叉管线的接口峰值变形(交叉管件处采用法兰接口)

Fig. 10 Peak seismic responses of double T-cross pipelines (cross pipelines with flange joints)

双 T_b , 双 T_c 3 种交叉处接口峰值张开量分别为 2.28, 2.97, 3.04 mm, 而简单 T 型、十字交叉处接口峰值张开量分别为 3.04, 3.05 mm; 说明交叉管件距离越近, 接口峰值张开量越小; 相当于增加了单位长度上的接口数量, 也即由较多的管线接口承担土体变形; 但由于多个邻近交叉管件的约束作用, 导致接口峰值转角小幅增加。

(2) 交叉处采用法兰接口

当双 T 型交叉处接口为法兰接口、其他位置处管线接口类型均为承插式接口时, 3 类双 T 型交叉管线的接口峰值变形如图 10 所示。法兰接口抑制了轴向拉伸及弯曲变形, 造成弯矩及轴向力的累积; 此外, 与抗拉能力相比, 法兰接口的承压能力较差。与不含法兰接口的情况(图 9)相比, 双 T 型交叉处法兰接口减少了接口的拉伸变形、弯曲响应。相比于十字型和 T 型交叉管线, 双 T 型管线交叉管件处的法兰接口个数达到 4 个, 所累积的轴力超过了承插式接口的极限承载力, 导致交叉处邻接的承插口张开量增大, 双 T_a 型、双 T_b 型及双 T_c 型邻接的承插接口张开量分别达到了 8.41, 11.03, 11.19 mm, 超出了承插口设计允许位移量 10 mm^[32]。

表 4 简单交叉管线响应汇总 (交叉管件连接采用法兰接口)
Table 4 Responses of simple cross pipe (cross pipelines with flange joints)

管线交叉形式	DIP 管线交叉			CIP 管线交叉		
	法兰接口峰值变形/mm	法兰邻接的承插接口峰值变形/mm	影响系数 λ	法兰接口峰值变形/mm	法兰邻接的承插接口峰值变形/mm	影响系数 λ
十字型	-0.52	8.50	1.46	-1.84	7.32	1.26
T 型	-0.52	8.49	1.46	-1.84	7.32	1.26
L 型	-0.04	5.67	—	-0.18	1.37	—

表 5 DIP 管线双 T 型交叉峰值响应

Table 5 Peak seismic responses of double T-cross DIP pipelines

交叉管件处接口类型	管线交叉形式	DIP 柔性接口峰值张开/mm		影响系数 λ	
		交叉处接口	邻接承插口	交叉处接口	邻接承插口
承插接口	双 T _a	2.28	5.63	0.39	—
	双 T _b	2.97	5.67	0.51	—
	双 T _c	3.04	5.67	0.52	—
法兰接口	双 T _a	-0.50	8.41	—	1.45
	双 T _b	-0.70	11.03	—	1.90
	双 T _c	-0.54	11.19	—	1.93

表 6 CIP 管线双 T 型交叉峰值响应

Table 6 Peak seismic responses of double T-cross CIP pipelines

交叉管件处接口类型	管线交叉形式	CIP 刚性接口峰值张开量/mm		影响系数 λ	
		交叉处接口	邻接承插口	交叉处接口	邻接承插口
承插接口	双 T _a	3.04	4.82	0.58	—
	双 T _b	3.24	4.89	0.63	—
	双 T _c	3.36	4.65	0.65	—
法兰接口	双 T _a	-1.74	7.29	—	1.41
	双 T _b	-1.85	9.34	—	1.81
	双 T _c	-1.85	9.44	—	1.83

(3) 管线与 CIP 管线响应对比

为便于比较, 将图 9, 10 中双 T 型交叉 DIP 管线响应汇总于表 5, 本节分析的双 T 型交叉 CIP 管线响应结果汇总于表 6。

对于 CIP 管线双 T 型交叉, 由于 CIP 管线刚度较大, 易产生更大的接口轴向力, 对交叉处法兰接口产生显著的挤压效应, 3 类双 T 型交叉处的法兰接口均遭到不同程度的压缩破坏, 法兰口压缩量分别为 1.93, 2.01, 2.02 mm, 超过了 ISO 规范^[16]的限值 0.72 mm。对于 3 种双 T 型交叉处法兰口邻接管线的承插式接口, 其接口峰值张开量依次为 7.27, 9.32, 9.43 mm, 接近承插口设计允许位移量, 影响系数分别为 1.41, 1.81, 1.83, 均小于 DIP 管线双 T 型交叉。

根据以上分析, 双 T 型交叉 DIP 管线及 CIP 管线响应特点可以概括为以下两个方面: ①DIP 管线接口刚度较小, 可承受的轴向拉力较少, 在交叉处法兰接口累积的轴向力导致法兰邻接管线的承插口的产生较大的变形; 如双 T_b 型法兰接口的 DIP 管线失效模式以法兰邻接的承插口受拉破坏为主; ②CIP 管线接口刚度较大, 刚性接口可承受的轴向压力较大, 使得的法

兰接口压缩量较大, 失效破坏模式以法兰接口受压坏为主。

2.4 地震动入射角的影响

对十字型和双 T_a 型交叉管线进行不同地震动入射角下的管线动力分析; 地震动入射方向与交叉管线干线 (x 向) 夹角为 0°, 30°, 45°。

图 11, 12 分别为十字型柔性接口管线和双 T_a 型柔性接口管线在不同入射角下的峰值变形。对于接口转角响应, 当入射角从 45° 变为 0°, 干线及支线接口转角随之减小, 但变化较小。针对干线接口张开响应, 在 0° 入射角工况下, 由于荷载方向与管线干线轴线平行, 地震动幅值并未发生折减, 干线峰值张开量大于其余入射角工况, 45° 入射角次之, 30° 入射角最小; 而对于支线接口张开响应, 0° 入射角工况下, 荷载方向与管线支线轴线夹角最小, 支线峰值张开量小于其余入射角工况, 3 种入射角工况下支管线峰值张开量依次为: 45° > 30° > 0°。

综上所述, 由于震幅分解及位移时滞的影响, 与 30°, 45° 入射角工况相比, 0° 入射角工况下交叉管线干线的接口张开响应更大; 而 45° 入射角工况下交

叉管线支线的接口张开响应最大。此外, 考虑到接口张开及弯曲失效准则, 相比于接口弯曲, 入射角不同对接口张开量的影响更大。

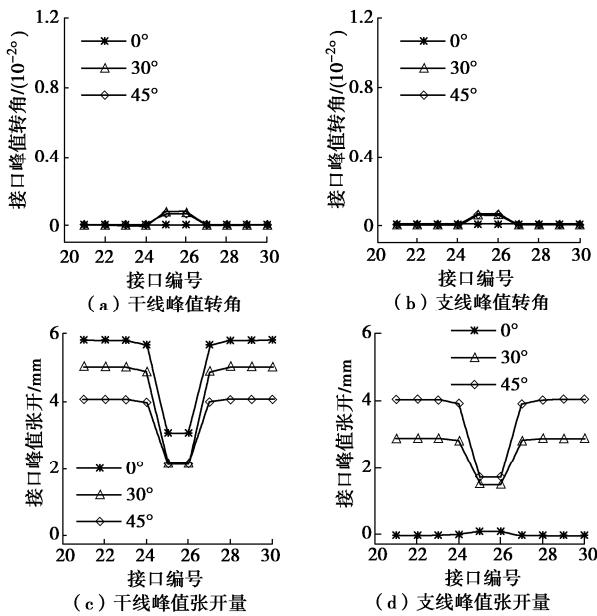


图 11 不同入射角下十字型管线接口响应

Fig. 11 Responses of cross pipeline joints at different incidence angles

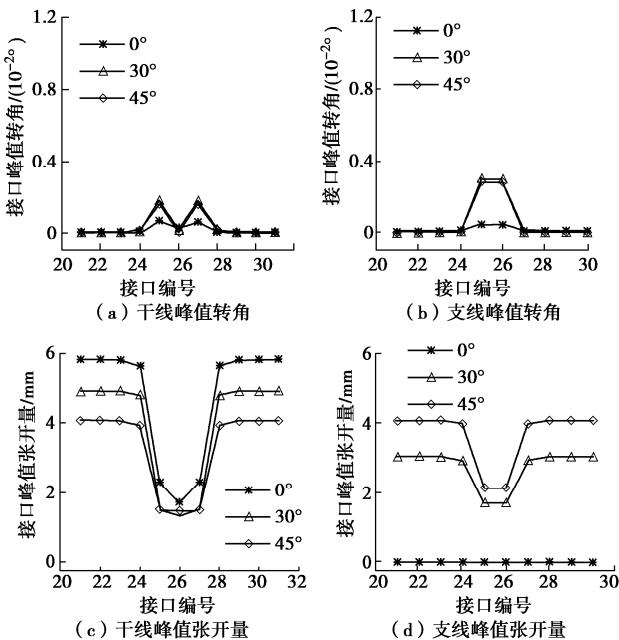


图 12 不同入射角下双 T 型管线接口响应

Fig. 12 Responses of double-T pipeline joints at different incidence angles

3 结 论

本文研究了地震波作用下不同交叉形式的柔性接口球墨铸铁管线 (DIP) 和刚性接口铸铁管线 (CIP) 的接口拉伸、压缩、转动。考虑了管土相对位移、管

土摩擦力、管线刚度、交叉管件类型以及交叉管件与各肢管线连接方式等因素的影响, 并得出以下 3 点结论。

(1) 对于地震波动产生的管周土体变形, DIP 管线主要由接口承担土体变形, CIP 管线主要由管体与接口共同协调承担土体变形。

(2) 采用承插式接口的十字、T、L 型交叉管线, 接口张开量为直管线的 52%~69%; L 型接口的转角峰值响应最大达 0.65° 。采用法兰交叉管件的 DIP 管线, 与法兰邻接的 DIP 柔性承插式接口变形发生突增, 导致承插式接口受拉破坏。对于采用法兰交叉管件的 CIP 管线, 其十字型、T 型交叉中法兰接口受压变形分别为 1.84, 1.84 mm 易导致法兰接口受压破坏。

(3) 对于采用承插式接口的双 T 型交叉管线, 与十字型、T 型交叉管线相比, 双 T 型交叉管件减小了交叉管件两端的接口峰值张开量, 其接口峰值张开量约为直管线的 39%~52%。对于采用法兰接口的双 T 型交叉管线, 双 T 型交叉管件增加了交叉处法兰接口邻接的承插式接口峰值张开量, 其接口峰值张开量约为直管线的 1.45 倍~1.93 倍。

值得注意的是, 本文采用正弦波作为地震动输入。后续埋地管线地震响应分析中, 可考虑地震动频谱特征及场地条件对于管线地震响应的影响。

参考文献:

- [1] O'ROURKE M J, LIU X. Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines[M]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2012.
- [2] 李杰. 生命线工程抗震: 基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (LI Jie. Structural Response Network Disaster Simulation Lifeline Ground Motion Reliability[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [3] NEWMARK N M. Problems in wave propagation in soil and rock[C]// Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials. Albuquerque, 1967.
- [4] ELHMAIDI K, O'ROURKE M J. Seismic damage to segmented buried pipelines[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(4): 529-539.
- [5] SINGHAL A C, ZUROFF M S. Analysis of underground and underwater space frames with slip joints[J]. Computers & Structures, 1990, 35(3): 227-237.
- [6] LIU W, SUN Q W, MIAO H Q, et al. Nonlinear stochastic seismic analysis of buried pipeline systems[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 74: 69-78.

- [7] SHI P X. Seismic wave propagation effects on buried segmented pipelines[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, **72**: 89-98.
- [8] 李锦强, 钟紫蓝, 史跃波, 等. 考虑土体参数不确定性的供水管道地震响应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, **55**(2): 45-53. (LI Jinqiang, ZHONG Zilan, SHI Yuebo, et al. Seismic analysis of water pipeline considering uncertainty of soil properties[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, **55**(2): 45-53. (in Chinese))
- [9] 侯本伟, 徐倩怡, 张亚波, 等. 土体参数随机场中承插式地下直线管道地震响应分析 [J/OL]. *工程力学*, 1-13[2025-01-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230519.1637.010.html>. (HOU Benwei, XU Qianyi, ZHANG Yabo, et al. Seismic response analysis of buried bell-and-spigot jointed pipeline considering random field of soil properties[J/OL]. *Engineering Mechanics*, 1-13[2025-01-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20230519.1637.010.html>. (in Chinese))
- [10] LIU W, SONG Z Y, WANG Y C. Seismic analysis of the connections of buried segmented pipes[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, **123**(1): 257-282.
- [11] 钟紫蓝, 张亚波, 侯本伟, 等. 考虑交叉管线影响的城市供水管网地震响应分析及震害评估[J]. *岩土工程学报*, 2023, **45**(5): 964-975. (ZHONG Zilan, ZHANG Yabo, HOU Benwei, et al. Seismic response analysis and damage assessment of urban water supply networks considering influences of crossing pipelines[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, **45**(5): 964-975. (in Chinese))
- [12] 钟紫蓝, 张亚波, 李锦强, 等. 球墨铸铁管道接口弯曲性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, **55**(9): 143-150. (ZHONG Zilan, ZHANG Yabo, LI Jinqiang, et al. Bending performance test of push-on joints of ductile iron pipelines[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, **55**(9): 143-150. (in Chinese))
- [13] RAJANI B, ABDEL-AKHER A. Performance of cast-iron-pipe bell-spigot joints subjected to overburden pressure and ground movement[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2013, **4**(2): 98-114.
- [14] American Lifelines Alliance (ALA). *Seismic Guidelines for Water Pipelines*[M]. Washhton D C: American Lifelines Alliance, 2005.
- [15] 压力容器 第 3 部分: 设计: GB/T 150.3—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. (Pressure vessels: Part 3: Design: GB/T 150.3—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese))
- [16] Rubber Seals-Joint Rings for Water: ISO 4633—2015[S]. 2015.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊为全国中文核心期刊、中国科学引文数据库 (CSCD) 核心期刊和中国科技核心期刊。本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”“Scopus 数据库”等国际数据库收录。本刊官网 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章, “中

国知网”“万方网”“维普网”全文收录本刊。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 222 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购 (不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)