



岩土工程学报  
Chinese Journal of Geotechnical Engineering  
ISSN 1000-4548, CN 32-1124/TU

## 《岩土工程学报》网络首发论文

题目: 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  
作者: 钟紫蓝, 张亚波, 侯本伟, 韩俊艳, 杜修力  
收稿日期: 2022-02-25  
网络首发日期: 2022-08-18  
引用格式: 钟紫蓝, 张亚波, 侯本伟, 韩俊艳, 杜修力. 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/OL]. 岩土工程学报.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20220817.1358.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 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

钟紫蓝, 张亚波, 侯本伟\*, 韩俊艳, 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:** 以北京市某地区埋地供水管网为实例, 通过直线型和交叉型典型管道二维有限元模型, 系统分析了管道规格、接口形式、场地条件、地震动强度等级和地震动入射角等关键参数对管道接口轴向和转角变形的影响, 得到了不同设防烈度地震动作用下该供水管网的损伤情况。基于国内外管道接口试验数据统计分析结果, 确定了基于接口变形量的管道损伤判定准则, 并用于不同管道接口类型地震损伤评价, 建立了不同场地条件下典型管道接口地震损伤数据库。根据管道属性、场地信息和管道接口地震损伤数据库, 基于 GIS 软件绘制管网地震损伤分布图。结果表明: 相同烈度地震作用下, 管线交叉处接口峰值变形量约为直管线接口的 1.5~2.0 倍, 其中与法兰接口邻接的承插式接口存在峰值变形突变。罕遇烈度地震动作用下的管网地震损伤程度远高于设防烈度, 且破坏多集中于 IV 类场地和管线交叉处。

**关键词:** 供水管网; 交叉管线; 接口变形; 有限元分析; 震害评价

**中图分类号:** TU990.3

**作者简介:** 钟紫蓝(1986-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事生命线地震工程方面的研究工作。E-mail: zilanzhong@126.com。

## Seismic response analysis and damage assessment of urban water supply network with crossing pipelines impact

ZHONG Zi-lan<sup>1</sup>, ZHANG Ya-bo<sup>1</sup>, HOU Ben-wei<sup>1</sup>, HAN Jun-yan<sup>1</sup>, DU Xiu-li<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the prototype of the a buried water supply network in Beijing, two-dimensional finite element models of the network are developed in this study. The influence of critical parameters, such as the pipe diameter, joint type, site condition, ground motion intensity level and seismic wave incident angle, on the axial and bending deformation of pipe joints are systematically investigated and the seismic damage status of the water supply network under different intensity levels of earthquakes are evaluated in this paper. Moreover, the criteria for pipeline damage assessment based on joint deformation are developed based on the statistical analysis of test results of domestic and international pipeline joints. These criteria are subsequently used for seismic damage assessment of different types of pipeline joints. A seismic damage database of typical pipeline joints buried in different engineering sites is established in this study. Finally, according to the pipeline properties, engineering site conditions and seismic damage database of typical pipeline joints, the seismic damage distribution maps of water supply networks are developed using GIS. It is found that the peak deformations of the joints at the pipeline cross junctions is about 1.5 to 2.0 times that of joints in a straight pipeline under the same intensity of earthquake ground motions. Besides, sudden changes of the peak seismic deformations present at the push-on joints located adjacent to the flange joints. The pipeline network suffers much severe seismic damage under maximum considered earthquake than under design-level of earthquake. The seismic damage mainly concentrates in the site class IV and the cross junction of pipelines.

**Key words:** water supply network; crossing pipelines; joint deformation; finite elements analysis; seismic damage assessment

## 0 引言

历史震害经验表明, 地震作用下城市供水管道破坏往往会造成巨大的经济损失, 给人们的日常生活带来严重影响。

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51978020); 北京市教委科技计划一般项目(KM201910005022); 国家重点研发计划项目(2018YFC1504305)

**收稿日期:** 2022-02-25

**\*通讯作者** (E-mail: benweihou@bjut.edu.cn)

1995年阪神地震<sup>[1]</sup>对供水管道造成了严重破坏,整个地震灾区受损的输水管道多达4000条,其中球墨铸铁管以接口滑脱为主,铸铁管和PVC管接口滑脱和管体损伤均有记录。2008年汶川8.0级地震<sup>[2]</sup>,震区中有448个乡镇的地下管线被严重破坏,其中131个乡镇共8070多公里的供水管道完全损毁。2016年日本熊本7.0级地震<sup>[3]</sup>,DN100~DN300管线破坏率达36%。通常情况下,供水管道的主要地震破坏形式<sup>[4]</sup>有以下3种:管体破坏、接口破坏和管件及连接处破坏,其中管道接口破坏是最为常见的破坏形式。

影响地下管线震害的主导因素是地震烈度、场地条件、管材管径和管道接口形式<sup>[4]</sup>。O'Rourke等<sup>[5,6]</sup>汇总整理了以往地震灾害中埋地管网的损伤状况并将地理信息系统(GIS)技术用于1994年北岭地震供水系统破坏情景的模拟。Shirozu等<sup>[6]</sup>调查了阪神地震中的供水管网受损情况,将破坏管线、支线网络、地表地质资料、液化程度和地震烈度等方面集成在GIS数据库中,分析了供水管线各种破坏模式的原因。冯启明<sup>[8,9]</sup>等结合计算模型结果和震害数据、专家经验,并考虑地震动强度、管道埋深和内压、温度等影响因素,建立了供水系统震害预测系统。Nourzadeh等<sup>[10]</sup>对德黑兰地区天然气管网进行地震危险性分析,采用有限元模型详细分析了不同土体中各类管径、管材和弯头形式管道的地震响应规律,建立了管道损伤评估准则,并利用GIS平台生成管网损伤空间分布图,最后针对损伤严重管线提出抗震改造措施。Makhoul等<sup>[11]</sup>对黎巴嫩比布鲁斯地区进行地震危险性分析,根据管道地震损伤经验公式,通过Ergo灾害风险评估软件对该地区不同土体中各类污水管道进行了震害预测,据此给出了城市污水管网抗震韧性的提升建议。总结而言,目前已有诸多学者针对地下管网震害预测及地震灾害情景可视化构建展开丰富研究和探讨,但依旧存在部分不足之处,首先在管线抗震能力评估方面,已有研究多集中于直管线接口轴向变形失效模式,而对于复杂交叉管线接口的轴向变形及转动失效模式研究较少;其次在管网整体的震害评估方面,管线震害经验公式对案例管网难以体现较为理想的适用性,缺少对案例场地的地震动背景、场地条件进行针对性的有限元模拟,无法更为真实可靠地确定管网中管线地震损伤的高危管线。

本文以北京市某地区埋地供水管网实例为对象,建立了不同管径、接口形式和土体条件的交叉管线有限元模型,根据案例场地条件信息拟合人工地震动,研究在不同地震强度等级下的供水管道接口地震响应

规律。并使用ArcGIS软件进行管道模型数据提取和属性处理,获得基于物理模型的城市供水管网抗震性能评价方法,实现了对城市供水管网抗震能力的空间分析与评价,为管线加固改造、管网系统功能评估提供依据。

## 1 基于物理模型的城市供水管网系统地震响应分析方法

本文根据实例管网的场地条件和管线属性参数,构建代表性管线地震响应分析模型,进而评估供水管网中所有管道的抗震性能,图1给出了基于物理模型的城市供水管网地震响应分析方法流程。

(1) 首先将案例供水管网数据、场地钻孔资料整理到GIS数据库中。

(2) 将案例管网所在区域划分为50m×50m的网格,根据场地勘察资料报告计算网格等效剪切波速及划分工程场地类型。

(3) 将管网分布图和网格场地分类图选择不同场地中代表性管线结构类型,建立有限元分析模型。

(4) 计算分析不同地震强度等级及地震动入射夹角下的管道接口响应规律,并统计每种地震动强度下的最不利工况组合。

(5) 结合国内外管道接口试验及相应规范限值要求,建立基于接口变形量的管道损伤划分等级表,并对各工况下的管道接口地震响应结果进行分类统计,赋予所有网格中管线元素损伤属性,最终可获得基于物理模型的城市供水管网系统地震损伤分布图。

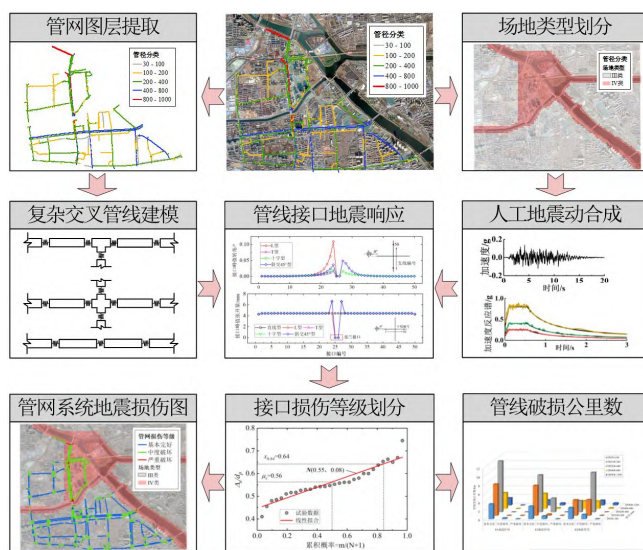


图1 基于物理模型的城市供水管网系统地震响应分析方法

Fig. 1 Seismic response analysis method for urban water supply network based on physical model



## 2 场地信息

本研究选取北京市某地区埋地供水管网所在场地条件,按照《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》(GB 50032-2003)<sup>[12]</sup>规定,该区域抗震设防烈度为8度区,场地类别为III类和IV类。本文选用研究区域中两种不同的典型土体条件分别代表该区域中III类、IV类场地中所有的地层类型,表1给出两类场地的土层物理参数信息。

表1 研究区域代表性地层参数信息

Table 1 Representational parameters of soil layers in target region						
场地 编号	土层种类	厚度 $H/m$	密度 $\rho/(kg/m^3)$	弹性模量 $E/MPa$	剪切波速 $V_s/(m/s)$	场地 类别
①	杂填土	3	1700	4	100	III类
	粉土	4	1850	12	75	
	中砂、细砂	5	1900	32	200	
	粉质粘土	6	1900	70	375	
②	碎石填土	4	1800	10	80	IV类
	细砂、粉砂	7	2300	56	180	
	细砂、中砂	4	2400	80	200	
	砂质粉土	7	1400	20	360	

## 3 数值模拟

### 3.1 管道模型

图2为典型供水管线数值分析模型,选择5种代表性交叉管线形式作为研究对象,分别为直线型、T型、L型、十字型、45°斜交型,其中不同管径交叉管件单肢长度依据ISO规范<sup>[13]</sup>规定的制造公称尺寸选取,其接口采用法兰连接形式,支干线中球墨铸铁单节管段长6m,接口形式均为胶圈柔性承插式连接,根据日本水道协会(JWWA)指南建议<sup>[14]</sup>,管线数值模型中干线和支线长度均取为300m。

图2(b)给出了具有相互独立的轴向、剪切向和弯曲弹簧的管道接口简化力学模型,在OpenSees中采用非线性弹簧单元拟合柔性承插式接口的非线性力与位移、弯矩与转角的力学关系。据国内外试验统计<sup>[19-28]</sup>,表2给出了典型管径的球墨铸铁管道接口模型力学参数,部分大管径接口力学参数按照线性插值法确定。轴向弹簧受压时的刚度设置与管道抗压刚度一致,管道接口剪切向弹簧刚度设置与管段的剪切刚度一致,用于模拟插口与承口发生受压碰撞时的力学响应。

不同管径的法兰盘尺寸、螺栓及密封垫片规格均统一按照国际规范<sup>[13]</sup>选取,法兰接口刚度取值依据目前广泛使用的Waters法<sup>[15]</sup>,其设计思想主要基于垫片系数 $m$ 和预紧比压 $y$ 两个参数,在根据垫片材料及法兰连接密封形式确定 $m$ 、 $y$ 的参数值后,进行正常使用状态下需要的最小垫片压紧力计算,在给出垫片应力的前提下进行力平衡的计算,结合案例管网平均供

水压力0.28MPa,换算出密封垫片初始压缩量以及法兰接口的刚度值。

表2 球墨铸铁管道接口模型参数<sup>[19-28]</sup>

Table 2 Parameter of DI pipe joint model <sup>[19-28]</sup>					
管径	峰值轴力 $F_u/kN$	接触转角 $\theta_1/(^\circ)$	接触弯矩 $M_1/(kN\cdot m)$	极限转角 $\theta_2/(^\circ)$	极限弯矩 $M_2/(kN\cdot m)$
150	9.2	7	1.46	13.1	14.83
200	11.6	6.6	2.86	12.5	7.6
300	17.4	5.8	3.57	-	-
400	21	3.9	6	10.5	10

### 3.2 土体模型

本文选用弹性地基梁模型模拟埋地管道在地震响应中的管-土相互作用,如图2所示,图中采用离散的非线性弹簧模拟管道与土体间的相互作用,根据美国生命线联盟(ALA)规范<sup>[16]</sup>推荐方法计算。

#### (1) 轴向土弹簧刚度计算

管道周围土体的力学特性决定了管道受到的水平双向土弹簧特性,单位长度上的轴向土体摩擦力由以下公式计算。

$$t_u = \begin{cases} \pi D \alpha S_u & \text{for 粘土} \\ \frac{\pi D}{2} \gamma H (1 + K_0) \tan k\phi & \text{for 砂土} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_u = \begin{cases} 2.54 \text{ to } 5.08 \text{ mm} & \text{for 砂土} \\ 5.08 \text{ to } 10.16 \text{ mm} & \text{for 粘土} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_u$ -管道单位长度上的峰值轴向土体阻力, $x_u$ -轴向土弹簧屈服位移, $D$ -管道外径, $\alpha$ -粘聚系数, $S_u$ -不排水剪切强度, $\gamma$ -土的有效重度, $H$ -管道埋深, $k_0$ -静止土体侧向压力系数, $k$ -管土间摩擦系数, $\phi$ -内摩擦角。

#### (2) 横向土弹簧刚度计算

$$P_u = \begin{cases} S_u N_{ch} D & \text{for 粘土} \\ \gamma H N_{qh} D & \text{for 砂土} \end{cases} \quad (3)$$

$$y_u = \begin{cases} 0.07 \text{ to } 0.1(H + D/2) \text{ mm} & \text{for 松砂} \\ 0.03 \text{ to } 0.05(H + D/2) \text{ mm} & \text{for 中砂} \\ 0.02 \text{ to } 0.03(H + D/2) \text{ mm} & \text{for 密实砂} \\ 0.03 \text{ to } 0.05(H + D/2) \text{ mm} & \text{for 硬到软砂} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_u$ -管道单位长度上的峰值横向土体阻力, $y_u$ -横向土弹簧屈服位移, $N_{ch}$ -与土体粘聚力有关的参数, $N_{qh}$ -土体内摩擦角有关的参数。

根据上文两类场地地表覆盖土物理力学参数进行土弹簧参数取值。以回填杂填土、DN200球墨铸铁管道为例,土弹簧模型参数取值:管道埋深 $H$ 均为2m,土体有效重度为17.4 kN/m<sup>3</sup>,静止土体侧向压力系数 $K_0$ 取0.46,在ALA规范中 $\tan k\phi$ 建议取值为0.6-0.7,本文取中间值0.65, $N_{qh}$ 根据ALA规范建议取11, $x_u$ 和 $y_u$ 分别取规范建议中位值3.81mm和188mm,根据式(1)、(3)计算得: $t_u=10.38$  kN/m,  $P_u=76.56$  kN/m。

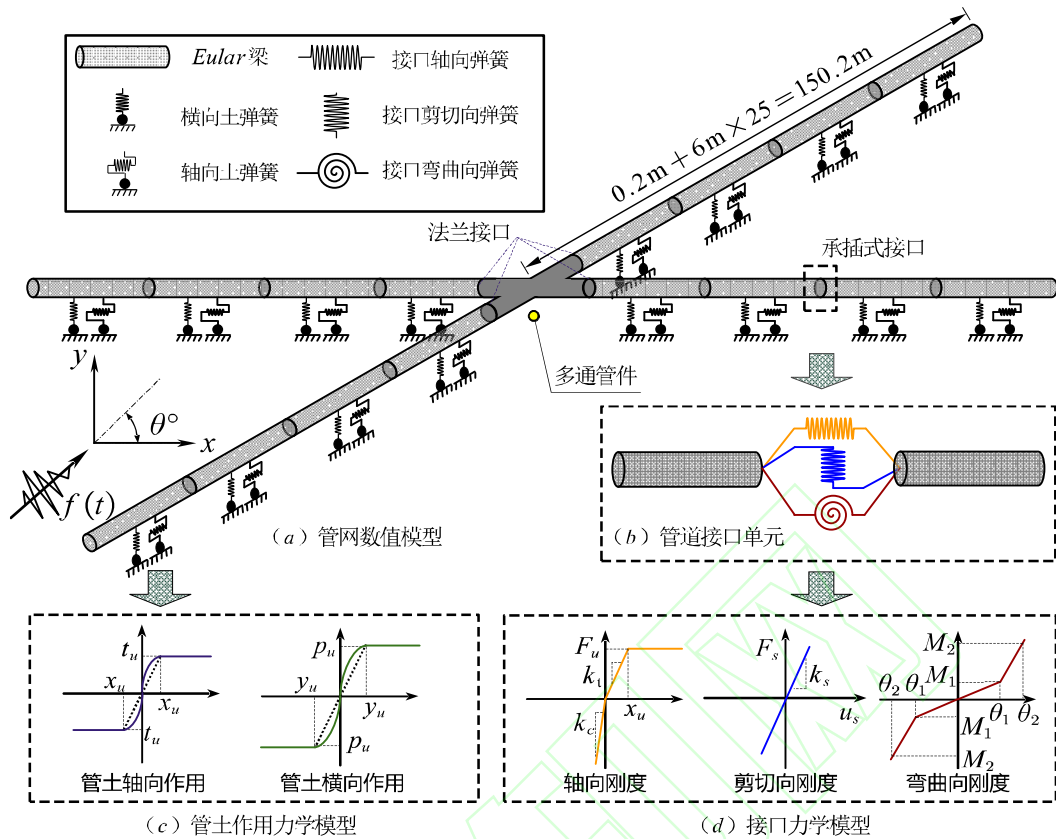


图 2 交叉管线数值模型  
Fig. 2 Numerical model of crossing pipelines

### 3.3 接口失效模式及损伤划分

基于已有试验研究及工程实践经验，以承插式接口的张开量与转角、法兰接口的压缩量及转角为损伤评价指标，评价该区域供水管网在不同地震动强度下的损伤程度。O'Rourke 等<sup>[17]</sup>统计出管道接口漏损张开量  $\Delta_u$  与承插口安装深度  $d_p$  比值的概率密度函数服从正态分布，并根据不同地应变下的管道接口易损性概率分布情况，确定铸铁管道在不同接口张开量下的每公里接口漏损数。本文借鉴 O'Rourke<sup>[17]</sup>提出的方法，对国

内外现有的球墨铸铁管接口力学性能试验数据进行汇总整理，并通过一种确定离散数据概率分布参数的方法（概率纸法）进行数理统计。球墨铸铁管接口力学性能试验数据见表 3，将管道接口漏损张开量  $\Delta_u$  与承插口安装深度  $d_p$  的比值记为随机变量  $X$ 。对随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_N$  的大小进行升序排列并编号，将第  $m$  个值绘制在累计概率值  $m/(N+1)$  处，依据概率纸法<sup>[18]</sup>即可判断随机变量  $X$  的数理统计规律。

表 3 球墨铸铁管道接口拉伸试验结果统计

Table 3 Statistics of tensile test results of DI pipe joints

样本编号	直径 $D/\text{mm}$	管内水压 $P/\text{MPa}$	接口渗漏张开量 $\Delta_u/\text{mm}$	安装深度 $d_p/\text{mm}$	随机变量 $X$ ( $\Delta_u/d_p$ )	参考文献
1	100 ~ 250	-	30.5	-	-	Singhal 等 <sup>[19]</sup>
2	200	0.4	41 ~ 49.16	100	0.41 ~ 0.492	刘为民等 <sup>[20]</sup>
3	150	0.2	70 ~ 80	94	0.745	周静海等 <sup>[21]</sup>
4	200	0.2	65	100	0.65	同济大学 <sup>[22,23]</sup>
5	200	0.6	48	100	0.48	
6	200	0.2	51.7 ~ 66.98	100	0.517 ~ 0.67	
7	150	0.38	56	85.8	0.653	Wham 等 <sup>[24]</sup>
8	200	1.0	60	100	0.6	王颂翔 <sup>[25]</sup>
9	150		52.6 ~ 53.1	100	0.526 ~ 0.531	李冠潮 <sup>[26]</sup>
10	200	0.2	55.3 ~ 56.2	100	0.553 ~ 0.562	
11	300		51 ~ 54	100	0.51 ~ 0.54、	钟紫蓝等 <sup>[27,28]</sup>
12	150	0~0.3	54.15 ~ 55.77	94	0.576 ~ 0.593	
13	200	0、0.1	60、58	100	0.6、0.58	
14	400	0	50	110	0.455	

经计算可得：球墨铸铁管道接口漏损张开量比例均值  $\mu = 0.55$ ，标准差  $\sigma = 0.084$ ，为考虑不同试验工况的随机误差，引入  $3\sigma$  准则<sup>[18]</sup>，以保证接口漏损张开量出现在区间  $[\mu \pm 3\sigma]$  上的概率为 99.74%，本研究将  $\mu - 3\sigma = 0.298$  作为接口严重破坏限值，对应接口张开量为 30mm。同时，我国《室外给水排水和煤气热力工程抗震设计规范》(GB 50032-2003)<sup>[12]</sup>中规定所有管径承插式类铸铁管接口设计允许位移量为 10mm，即为正常使用极限状态限值。

对于承插式柔性接口球墨铸铁管线，管线弯曲变形主要集中在柔性接口处，而管段自身所产生的变形较小，通常地震作用下不会产生塑性变形，因此本文假设球墨管道材料为线弹性，弹性模量  $E_p = 160 \text{ GPa}$ 。我国球墨铸铁给排水管道工程施工及验收规范技术要求<sup>[29]</sup>给出了不同管径的 T 型接口设计允许偏转角度，同时取其 75% 作为安装过程中允许偏转角，为便于供水管网损伤状态统一化比较，本文分别取该两值作为正常使用极限状态限值与严重破坏限值。

法兰接口发生密封失效的原因在于，当法兰发生偏转时，法兰与垫片间的接触面间隙使得密封面无法完全贴合，最终导致泄露发生。法兰偏转是由外荷载、介质压力及螺栓荷载共同作用下引起的法兰体的弯曲变形、垫片的非均匀压缩及螺栓弯曲这三种变形相互协调共同造成的。为此，本文法兰接口的损伤状态按照《压力容器》<sup>[15]</sup>与 ISO 规范限值确定，其中 ISO 规范<sup>[30]</sup>给出橡胶垫圈密封压缩量不宜大于初始厚度  $h_0$  的 50%，否则易发生胶圈材料压缩破坏，因此选取该值作为正常使用极限状态限值；《压力容器》中对于整体法兰，限制接口转角不超过  $0.3^\circ$ ，以保证法兰的紧密性，为此选取该值作为接口严重破坏限值。

通过上述归纳的试验研究及规范允许变形值，分别总结出正常使用极限状态限值与严重破坏限值，进而可将管道接口性能状态划分为三个区间等级，依次为基本完好、中等破坏和严重破坏。

(1) 球墨铸铁管道承插式接口

$$[U] = \begin{cases} d \leq 10 \text{ mm} \text{ 且 } R_0 \leq 0.75 R_{oc} & \text{基本完好} \\ 10 \text{ mm} < d \leq 30 \text{ mm} \text{ 或 } 0.75 R_{oc} < R_0 \leq R_{oc} & \text{中等破坏} \\ d > 30 \text{ mm} \text{ 或 } R_0 > R_{oc} & \text{严重破坏} \end{cases}$$

(2) 法兰接口

$$[U] = \begin{cases} \zeta \leq 50\% & \text{基本完好} \\ \zeta > 50\% & \text{中等破坏} \\ R_0 > 0.3^\circ & \text{严重破坏} \end{cases}$$

式中： $d$ -接口峰值张开量； $R_0$ -接口峰值转角； $\zeta$ -密封垫片压缩比 ( $\Delta h/h_0$ )； $R_{oc}$ -接口设计允许转角。

## 4 地震动输入

考虑到城市供水管网系统为浅埋类地下结构，通常埋深不超过 5m，本文近似选取地表地震动进行管线地震反应分析。为研究不同地震作用强度的影响，分别根据案例区域 III 类和 IV 类场地地表设计反应谱合成 6 条人工地震动，对应 50 年超越概率分别为 63% (E1)、10% (E2) 和 2% (E3)，其加速度时程及反应谱见图 4。

针对不同交叉形式的管线数值模型建立整体坐标系，如图 3 所示，假设地震波  $f(t)$  从坐标原点开始传播，并在平面内与供水管网整体坐标  $x$  轴呈  $\theta^\circ$  向外传播。本文采用地震动多点非一致激励分析时只考虑传播过程中的行波效应。根据两类场地 (III 类和 IV 类) 土层的等效剪切波速，分别依据工程经验视波速  $v_{app}$  取值为 300 m/s 和 150 m/s<sup>[31]</sup>，进而求得每个输入点  $d(x_i, y_i)$  处在传播方向上的地震动时程  $f_i(t)$ ，将  $f_i(t)$  沿  $x$  轴和  $y$  轴分解得到输入点时程  $f_{ix}(t)$  和  $f_{iy}(t)$ 。

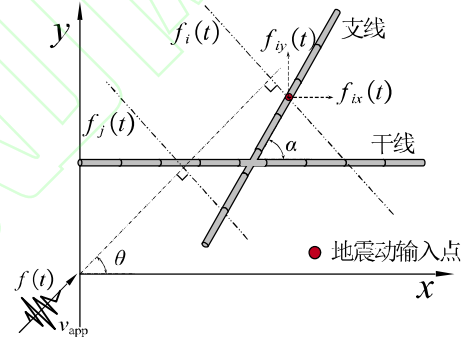
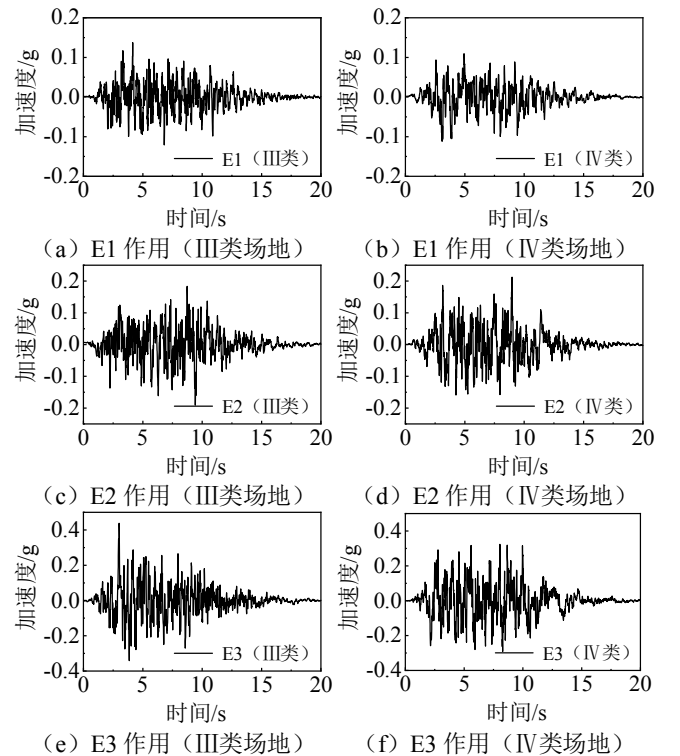


图 3 地震动输入点坐标转换

Fig. 3 Coordinate transformation of input ground motions





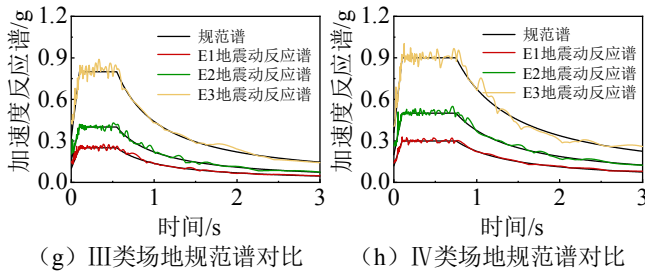


图4 人工合成地震动加速度时程

Fig. 4 Time history of artificial ground motions

## 5 管线抗震分析结果

该研究区域供水系统管道总长度约为 40km, 主干管线管材为球墨铸铁管, 公称管径为 DN100 ~ DN1000, 管道埋设深度位于地下 1.5m ~ 2.5m 范围内, 根据规范<sup>[29]</sup>要求, 管顶最小覆土深度不得小于土壤冰冻线 (北京 0.85m) 以下 0.15m, 同时为便于数值模型计算, 本文暂时不考虑管网高程差的影响, 所有管线模型埋深均统一取为 2m。其中交叉管件与各支管线的连接形式为法兰连接, 其余直管段均采用承插式柔性接口连接, 具体管道规格参数见表 4。

根据上述建模方法建立不同工况下的交叉管线数值模型, 包括直线型、T 型、L 型、十字型和斜交 45° 型五种形式, 为便于比较不同接口形式的地震响应, 统一将水平  $x$  向管线定义为干线, 另一侧管线为支线; 将与交叉管件邻接的承插式接口峰值张开量与直线型管线接口峰值张开量的比值定义为影响系数  $\lambda$ 。

表 4 研究区域管道规格

Table 4 Pipeline types in target region

管道 编号	规格/mm 内径×壁厚×长度	
1	100×9×6000	
2	200×12×6000	
3	400×15×6000	
4	600×15.8×6000	
5	1000×18×6000	

### 5.1 接口交叉形式的影响

在 III 类场地 E2 地震作用下, 地震动入射角为 0° 时, 不同交叉形式的 DN200 管线接口峰值张开量及转角响应见图 5。当入射角为 0° 时, 干线与地震动入射方向平行, 支线与入射方向垂直, 因此接口轴向变形基本集中于干线, 接口横向弯曲变形多集中于支线。

图 5 (a) 中, T 型、十字型和斜交 45° 型的接口峰值张开量变化基本一致, 交叉管线处法兰连接的抗拉刚度较大, 因而其接口张开量相对较小, 均未超过 0.002mm, 远小于螺栓屈服位移。法兰接口峰值压缩量达至 0.6mm 左右, 根据损伤指标划分, 橡胶垫片安

全可压缩量为 0.78mm, 因此法兰接口功能状态处于基本完好状态。与法兰接口邻近的承插式接口出现变形突变, 峰值张开量达到 6.6mm 左右, 其影响系数  $\lambda=1.5$ ; 交叉管件与其邻接的承插式管道影响范围有限, 基本在 2 个接口数左右, 当远离交叉管件时, 承插式接口张开量降至 4.4mm, 小于规范允许变形值 10mm。

图 5 (b) 为支线上所有接口峰值转角, 此时四种交叉形式的管线接口弯曲变形呈现出不同的分布规律。L 型管线接口的峰值转角最大, 达到 0.11°, 斜交 45° 型管线次之, T 型和十字型支线峰值转角最小。

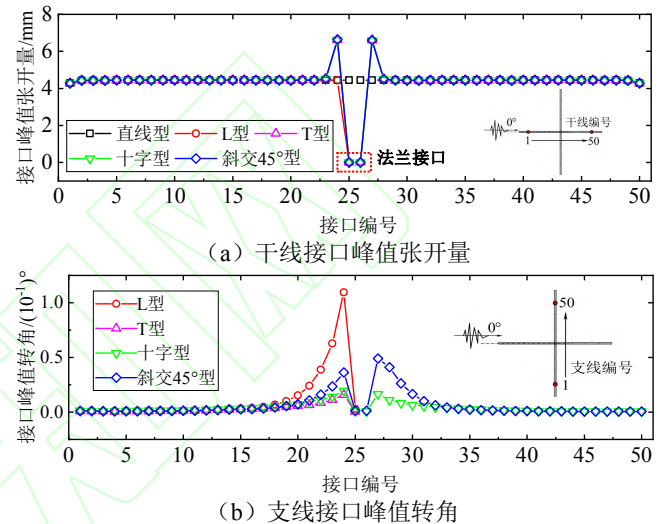


图 5 DN200 支干线接口地震峰值响应 (III 类场地、E2 地震)

Fig. 5 Peak seismic response of DN200 joints in main and branch pipelines (Site class III, Intensity of E2)

### 5.2 地震动入射角的影响

在 III 类场地 E2 地震作用下, 选取 L 型和十字型交叉管件, 分别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结构对称轴呈 0°、30°、45°, 如图 6 所示。

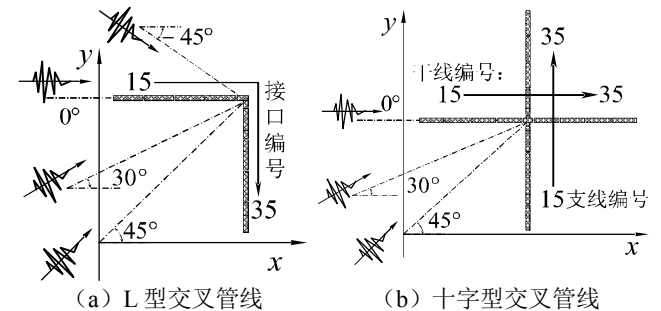


图 6 不同平面入射角

Fig. 6 Schematic of different plane incident angles

图 7 为在不同地震动入射角下的 L 型交叉管线接口峰值变形, 根据 5.1 节所得出的规律, 在远离交叉管件的直管线处, 接口峰值变形均为稳定值, 因此本节分析交叉管件左、右侧部分管线接口处的响应结果。不同地震动入射夹角对数值模型的影响, 体现在相邻

土节点处地震动的延时距离及地震动双向分解后的幅值差异，因此不同的地震动入射角下管线接口的峰值变形分布规律各有差异。当地震动传播方向与管线结构对称轴平行或垂直时，管线各接口响应也呈对称分布，如  $45^\circ$  与  $-45^\circ$  夹角下的管线接口响应基本一致；当入射角减小至  $0^\circ$  时，荷载方向与管线结构具有更

强的非对称性，管道干线各接口张开量与支线接口转角随之增大，在交叉管件接口处更易发生扭转破坏。L 型交叉管件邻接的承插式接口未出现突变变形，且不同入射角度对峰值张开量影响系数  $\lambda$  的影响较小，在四种入射角下影响系数  $\lambda$  均为 1.02 左右。

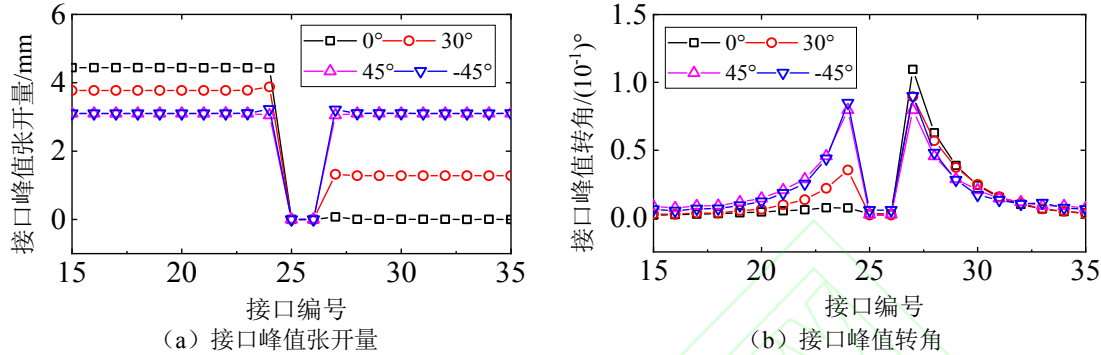


图 7 不同入射角下 L 型管线接口响应 (III类场地, E2 地震)

Fig. 7 Response of L-type pipeline joints at different incidence angles (Site class III, Intensity of E2)

图 8 为十字型交叉管线在不同地震动入射角下的接口峰值变形，不同于上文所述 L 型管线的接口响应规律，在十字型交叉管线中，法兰接口对承插式柔性接口的影响更为显著。不同入射夹角对支干线各接口的峰值变形影响规律类似 L 型管线，当入射角从  $45^\circ$  逐渐减小至  $0^\circ$ ，干线接口张开量、支线的横向转角

也随之增大，而不同入射角度对峰值张开量影响系数  $\lambda$  的影响较小，在三种入射角下  $\lambda$  均为 1.5 左右，在该三种工况下，干线接口峰值张开量依次为 4.7mm、5.6mm 和 6.6mm，支线接口峰值转角均小于  $0.03^\circ$ ，法兰接口与承插式接口变形均未超过正常使用极限状态限值。

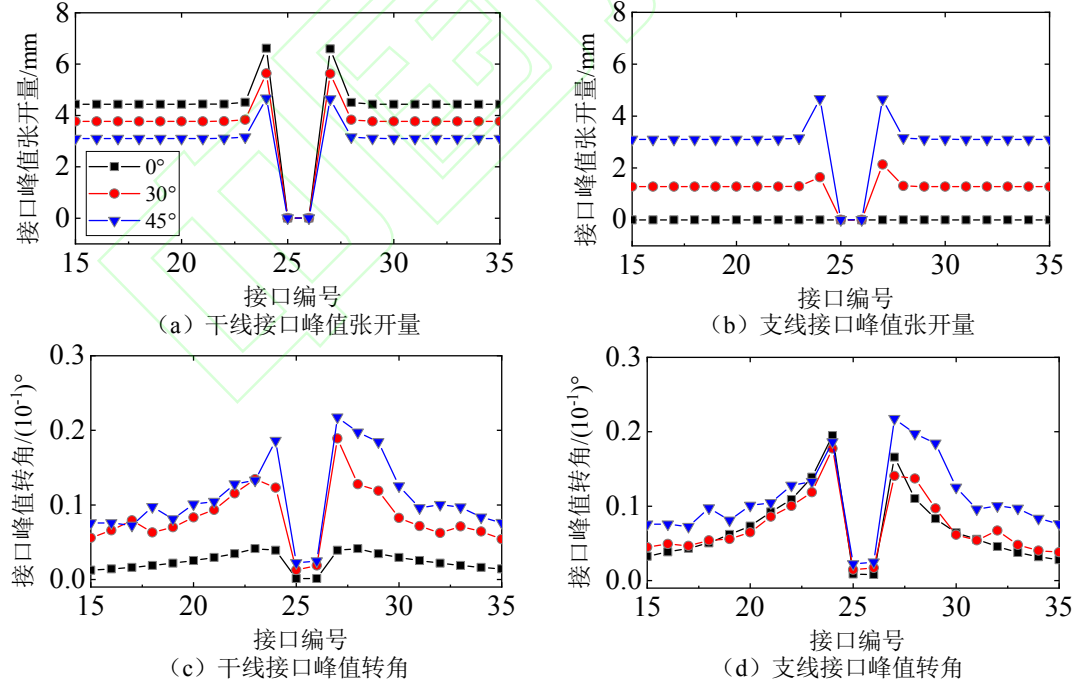


图 8 不同入射角下十字型管线接口响应 (III类场地, E2 地震)

Fig. 8 Response of cross-type pipeline joints at different incidence angles (Site class III, Intensity of E2)

根据图 7 和图 8 的分析，不同地震动入射角度对接口响应结果的影响可以概括为以下两方面：(1) 入射方向与主干管线夹角较小时，会产生较高的管线接口位移和转角，如在  $0^\circ$  入射下 L 型交叉管线以干线

接口张开量和支线转角变形为主；(2) 入射方向与主干管线夹角较大时，如  $45^\circ$  入射下十字型交叉管线以干支线接口转角为控制破坏模式。由于不同入射角影响地震动分解后的幅值大小及延时距离，如  $0^\circ$  入射



下为原始地震动幅值,同时地震动入射方向上相邻土节点间距较远,体现出更强的时滞性,进而接口响应较其他工况更为剧烈,为此,下文数值计算模型均选用  $0^\circ$  入射角作为最不利分析工况。

### 5.3 地震强度及场地类型的影响

根据提供的地勘资料显示,该研究区域按《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》<sup>[12]</sup>,可大致分为III类和IV类两种场地类型。本文分别选用两类场地中表层覆盖土参数信息作为土弹簧建模参数,并根据相应的视波速对地震动进行延时处理,并采用  $0^\circ$  入射角进行建模计算。现分别提取 E1、E2 和 E3 地震作用下 DN200 球墨铸铁管线在两类场地中的响应结果,选用常见的 L 型和十字型管线形式进行对比分析。

图 9 为不同地震作用下两种管线形式的支干线接口峰值变形,在III类场地中, L 型管线在 E1 至 E3 地震作用下干线接口峰值张开量分别为 2.4mm、4.4mm 和 7.3mm,在 E3 作用下,支线接口峰值转角达至

$0.31^\circ$ , 不过管线整体均处于基本完好状态。而在IV类场地中,干线接口峰值张开量依次为 4.3mm、9.3mm 和 17.3mm,相较III类场地的结果分别增大了 79%、111%和 137%,此时在 E3 地震作用下干线接口已出现中等破坏。

十字型管线接口破坏形式更为多样,在III类场地中, E1 和 E2 地震作用下管线基本未出现损伤,而在 E3 作用下,法兰接口峰值压缩量已达 1.1mm,承插式接口峰值张开量为 11mm,均已超过正常使用极限状态限值。IV类场地中,两种形式的管道接口在 E2 地震作用下便已出现中等破坏,在 E3 作用下,承插式接口峰值张开量更是达到 28.7mm,已接近严重破坏。同时,在不同场地中,管线接口张开量影响系数也存在差异,在III类场地中,三种强度地震动下影响系数  $\lambda$  均在 1.5 左右,而IV类场地中,从 E1 至 E3 作用下,影响系数  $\lambda$  依次为 1.49、1.61 和 1.67。

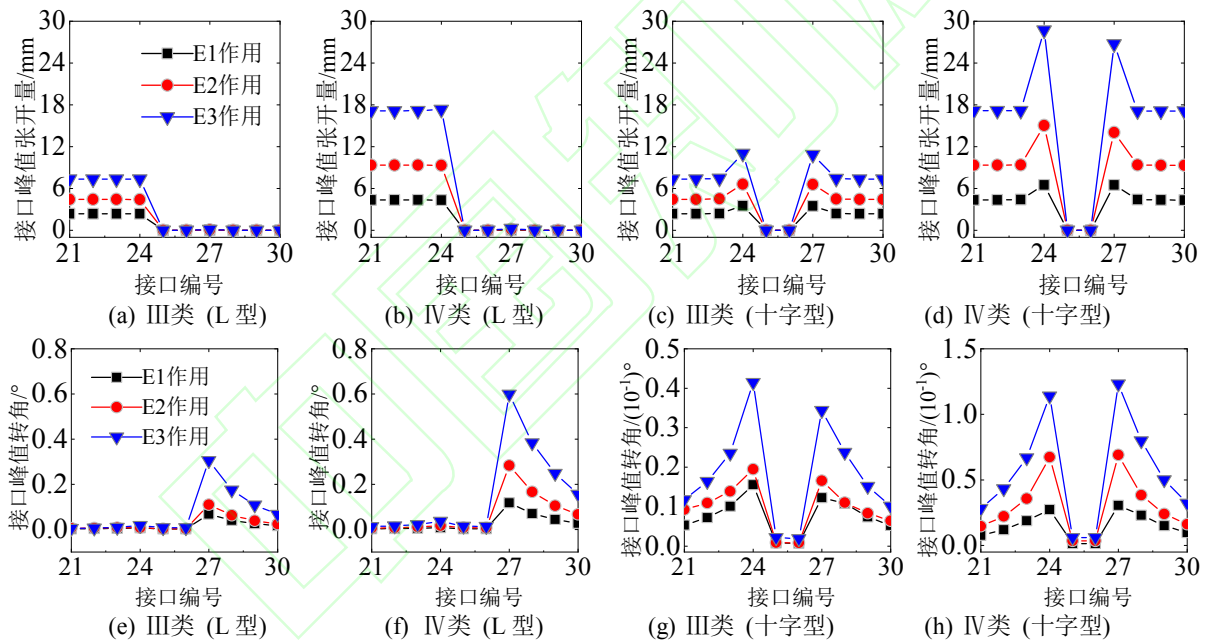


图9 两类场地下管线接口峰值变形

Fig. 9 Peak deformation of pipeline joints at two engineering sites

### 5.4 管道直径的影响

表 5 给出了在III类场地, E2 地震作用下, 五种不同管径的十字型管线在地震动  $0^\circ$  水平入射下, 支干线所有接口的峰值变形, 其中不同管径的交叉管线数值模型差异主要体现在管道物理尺寸、接口刚度取值以及土弹簧刚度。为了更明显比较出不同管径对交叉管线接口地震响应规律的影响, 现对结果数据进行标准化处理, 将各管径工况下的计算结果与 DN100 管径下的结果作除, 以直观体现出管径对接口变形的影响程度, 具体结果见图 10。

在远离交叉处的直管线, 不同直径管线的接口峰

值张开量差异较小, 均稳定于 4.4mm 左右; 根据共同变位的假定, 对于分段埋地管道, 在地震作用下的土体变形由管道柔性接口承担, 在直管线段的接口响应规律符合规范认知。同时, 在交叉管件邻接管段的接口峰值张开量受管径影响依旧较小, 从 DN100 至 DN1000, 承插式接口  $d_{\max}$  仅增加了 0.2mm, 但峰值转角  $R_{\max}$  则增长了一倍, 但在变形量上均处于基本完好状态。反观法兰接口的地震响应则有着相反的发展规律, 接口峰值压缩量与转角均随着管径的增加而减小; 原因在于随着管径增加, 法兰接口刚度较同管径下的承插式接口刚度增长更快, 进而交叉管件法兰接

口与其邻接的承插式接口的刚度差更大，导致土体变形由承插式柔性接口承担较多的变形量，其中 DN100 管线法兰接口峰值压缩量  $u_{\max}$  已达到 0.87mm，超出 ISO 限值 0.72mm，发生中等破坏。

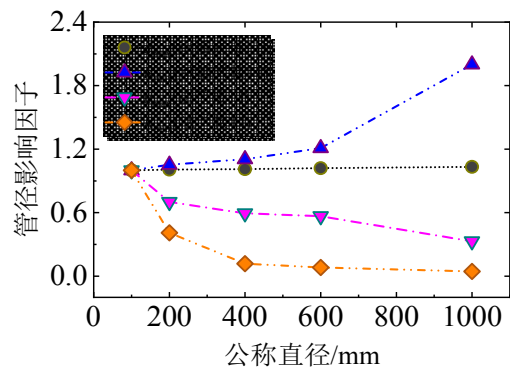


图 10 不同管径下的管道接口响应影响因子

Fig. 10 Influence factors of pipeline joints response under different pipe diameters

表 5 交叉管线接口响应结果

Table 5 Seismic response of cross-type pipeline joints

公称直径	承插式接口		法兰接口	
	峰值张开量 $d_{\max}/\text{mm}$	峰值转角 $R_{\max}/(10^{-2})^{\circ}$	峰值压缩量 $P_{\max}/\text{mm}$	峰值转角 $R_{\max}/(10^{-3})^{\circ}$
100	6.33	1.9	0.872	2.2
200	6.37	2.0	0.611	0.9
400	6.40	2.1	0.518	0.26
600	6.46	2.3	0.494	0.18
1000	6.54	3.8	0.287	0.1

表 6 管线接口损伤表

Table 6 Statistics of pipeline joint damage

接口形式	场地类型	管径	多通形式	地震动等级	损伤分类
承插式接口	III类	All	直线/L 型	E1/E2/E3	基本完好
			T 型/十字型/斜交型	E2	基本完好
				E3	中等破坏
		All	All	E1	基本完好
			直线/L 型	E2	基本完好
	IV类	All	T 型/十字型/斜交型	E2	中等破坏
			直线/L 型		中等破坏
				E3	中等破坏
		<DN600	T 型/十字型/斜交型		中等破坏
		≥DN600			严重破坏
法兰接口	III类	All	L 型	E1/E2/E3	基本完好
		DN100		E1	基本完好
		DN200	T 型/十字型/斜交型	E2/E3	中等破坏
				E1/E2	基本完好
				E3	中等破坏
	IV类	≥DN400		E1/E2/E3	基本完好
		All	L 型	E1/E2/E3	基本完好
		DN100		E1/E2/E3	中等破坏
		DN200	T 型/十字型/斜交型	E1	基本完好
				E2/E3	中等破坏
		≥DN400		E1/E2/E3	基本完好

## 6 管网震害评价

依托 GIS 软件将场地分类图件和管网分布图叠加，根据供水管线的结构参数、场地参数及管线连接

## 5.5 接口损伤结果

本研究针对六种管径、五种管线交叉形式、两种管道接口类型、两种不同场地类型，三种地震强度等级及多种地震动入射角进行组合建模。表 6 为各工况下管线接口的损伤情况，其中直线型与 L 型管线接口损伤分类基本一致，其承插式接口与法兰接口在大部分工况下均处于基本完好状态，而 T 型、十字型和斜交型管线由于在交叉管件邻近接口处发生突变变形，因此损伤状态较为多样。其中承插式接口基本随着地震强度等级增加，发生中等破坏的概率也逐渐增大，当管径大于 DN600 时，在 IV 类场地，E3 作用下，多通接口处甚至出现严重破坏。而法兰接口损伤基本集中于密封垫片压缩破坏，当管径较小时，接口更易发生中等破坏，当管径大于 DN400 时，法兰接口受损数量逐渐减小，接口性能大多处于基本完好状态。

根据表 6 的分析，可总结不同建模关键参数对管线结果的影响：（1）管径影响的差异，主要体现为法兰接口刚度与承插式接口刚度增加程度的差异；（2）直管线模型的结果均较为安全，而实际工程交叉管线模型规律各有差异，如 L 型管线以接口转角控制破坏模式为主、十字型管线以接口张开量控制破坏模式为主；（3）不同地震动入射角的影响，体现在模型土节点处地震动分解幅值及时滞性的差异。

形式，将表 6 中不同工况下的数值模拟结果进行损伤类别与管线 GIS 图层属性连接，得到该区域供水管网在不同强度地震动下的接口损伤分布，如图 11 所示。

由于该研究区域被划分为若干 50m×50m 的网

格,其中河道周边场地(图中浅红区域)为IV类场地,其余场地均为III类场地(图中灰色区域)。总体而言,在多遇地震作用 E1 下,供水管线基本处于结构完好状态,可以保持服务功能。在基本设防烈度地震作用 E2 下,集中于河道周围的IV类场地中的部分管线出现

了中等破坏。在罕遇地震作用 E3 下,IV类场地中的供水管网基本处于中等破坏状态,部分大管径管线交叉接口处发生严重破坏;在III类场地下也存在较多接口处于中等破坏。因此,E3 地震作用下会产生较多的接口破损,需研究后续的改造和应对措施。

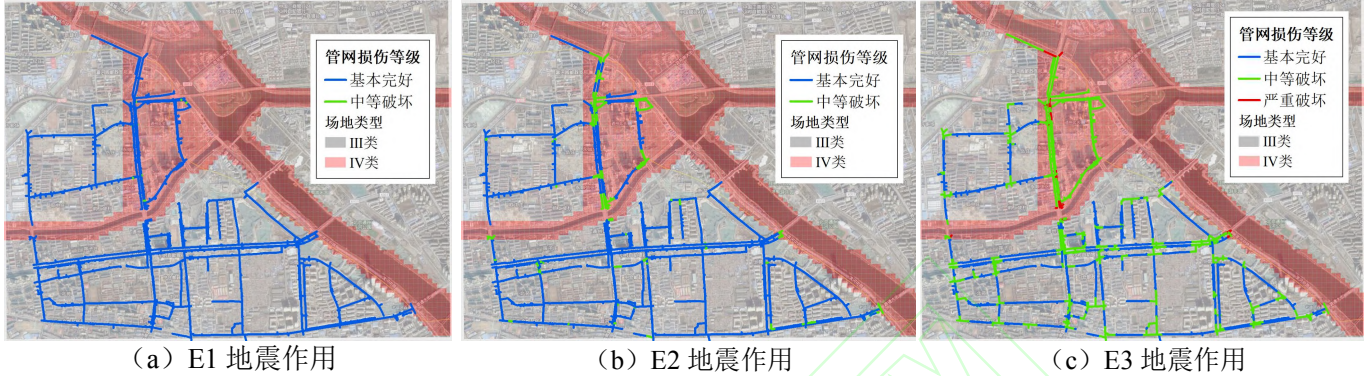


图 11 供水管网地震损伤分布

Fig. 11 Damage distribution map for water supply network

图 12 给出了不同强度地震作用下供水管网整体受损公里数,该图基于上文给出的地震损伤图,统计出每个网格中不同受损状态下的管线长度并进行汇总分析。其中 E1 地震作用下, DN30~DN100 间管线存在少量中等破坏状态,在 E2 地震作用下,约有 38%

的 DN200~DN400 间管线总长出现了中等破坏,其余管径管线也均出现少量破坏。而在 E3 地震作用中, DN100~DN400 间的管线占据了 77%的中等破坏管线总数,同时, DN800~DN1200 间管线总长中存在 29% 处于严重破坏状态。

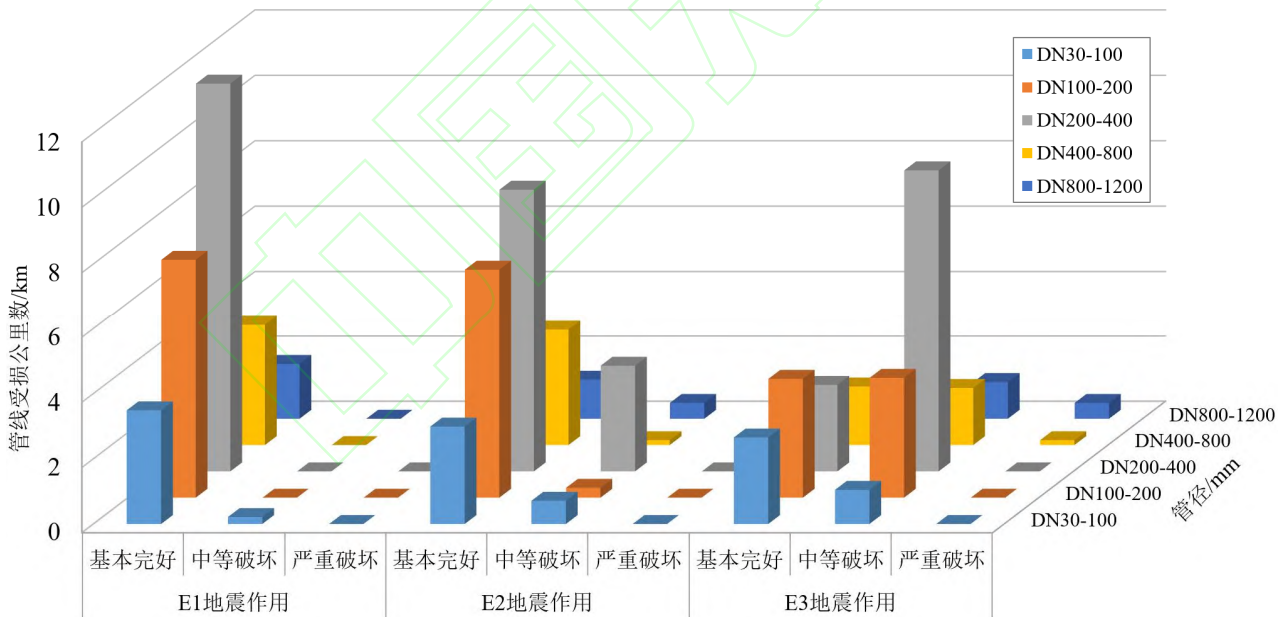


图 12 管网受损公里数分布

Fig. 12 Distribution of total damaged length for pipeline network

## 7 结论

本文采用数值模拟的方法,建立基于案例管网场地、地震动、管线等真实条件的有限元模型,考虑了复杂交叉管线接口拉伸、转动失效模式,结合 GIS 技术分析了北京市某地区埋地供水管网在不同强度地震作用下的损伤情况,实现了对城市供水管网抗震能力

的空间分析与评价,为管线加固改造、管网系统功能评估提供依据,并得出以下结论:

(1) 除了 L 型管线外,在 T 型、十字型及斜交型管线中的多通连接处,与法兰接口邻近的部分插式接口存在着变形突变现象,其峰值张开量影响系数  $\lambda$  (交叉管线变形量与直管线变形量之比) 约在 1.5~2.0 间,同时影响系数  $\lambda$  随着地震动强度等级的增加而增



大。

(2)当地震动入射方向与管线结构存在较强的非对称性时,交叉接口处更易发生扭转破坏,当入射角度为 $0^{\circ}$ 时,不规则的管线交叉形式易产生更大的接口响应,此时管线接口峰值转角呈现出L型>斜交 $45^{\circ}$ 型>十字型>T型>直线型的规律。

(3)直管线基本以接口张开量作为控制破坏模式,特别地, $0^{\circ}$ 入射下L型管线分别以干线接口张开量和支线接口转角为控制破坏模式,而十字型管线均以接口张开量作为控制失效模式。

(4)在多遇地震和基本烈度地震作用下,该区域供水管网基本处于功能安全状态,而在罕遇地震作用下,管网破坏多集中于IV类场地,其中IV类场地中的供水管网基本处于中等破坏状态,部分大管径的管线交叉接口处发生严重破坏,同时,在III类场地下也存在较多接口数处于中等破坏。

#### 参考文献:

- [1] TOSHIMA T, IWAMOTO T, NAKAJIMA T. 2000. Study on behavior of buried pipes in liquefied ground[C]. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- [2] 李 乔, 赵世春. 汶川大地震工程震害分析[M]. 西南交通大学出版社, 2008. (LI Qiao, ZHAO Shi-chun. Analysis of seismic damage of engineering structures in wenchuan earthquake[M]. Southwest Jiaotong University Press, 2008. (in Chinese))
- [3] WHAM B P, DASHTI S, FRANKE K, etc. Water supply damage caused by the 2016 Kumamoto Earthquake. Lowland technology international: the official journal of the International Association of Lowland Technology[J], 2017, **19**(3):151-160.
- [4] 李 杰. 生命线工程抗震[M]. 科学出版社, 2005. (LI Jie. Lifeline engineering earthquake resistance[M]. Science Press, 2005. (in Chinese))
- [5] O'ROURKE T D, JEON S S, TOPRAK S, et al. Earthquake Response of Underground Pipeline Networks in Christchurch, NZ[J]. Earthquake Spectra. 2014, **30**(1): 183-204.
- [6] O'ROURKE M J, LIU X. Response of Buried Pipelines Subjected to Earthquake Effects[M]. University of Buffalo, USA, 1999.
- [7] SHIROZU T, YUNE S, ISOYAMA R, et al. Report on damage to water distribution pipes caused by the 1995 Hyogoken - Nanbu (Kobe) earthquake[J]. Terremotos. 1996: 93-110.
- [8] 冯启民, 高惠瑛, 俞虹桥. 供水系统震害预测专家系统[J]. 地震工程与工程振动. 2000, **20**(03): 67-75. (FENG Qi-min, GAO Hui-ying, YU Hong-qiao. An expert system for predicting damage to water delivery systems[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2000, **20**(03): 67-75. (in Chinese))
- [9] 冯启民, 高惠瑛, 张伟林. 天津开发区供水系统地震反应分析[J]. 自然灾害学报. 2000, **9**(04): 39-44. (FENG Qi-min, GAO Hui-ying, ZHANG Wei-lin. Seismic performance analysis of water delivery systems in Tianjin Economic Developed Area[J]. Journal of Natural Disasters. 2000, **9**(04): 39-44. (in Chinese))
- [10] NOURZADEH D, MORTAZAVI P, GHALANDARZADEH A, et al. Numerical, experimental and fragility analysis of urban lifelines under seismic wave propagation: Study on gas distribution pipelines in the greater Tehran area[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2020, **106**: 103607.
- [11] MAKHOUL N, NAVARRO C, LEE J S, et al. A comparative study of buried pipeline fragilities using the seismic damage to the Byblos wastewater network[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2020, **51**: 101775.
- [12] 室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范: GB 50032—2003[S]. 2003. (Code for seismic design of outdoor water supply, sewerage, gas and heating engineering: GB 50032—2003[S]. 2003. (in Chinese))
- [13] ISO 2531:2009. Ductile iron pipes, fittings, accessories and their joints for water applications[S]. 2009.
- [14] Japan Water Works Association (JWWA). (1997). Seismic Design Specifications for Water Facilities – In Japanese.
- [15] 压力容器 第3部分:设计: GB 150.3-2011 [S]. 2011. (Pressure vessels-Part 3: Design: GB 150.3-2011 [S]. 2011. (in Chinese)).
- [16] American Lifelines Alliance (ALA). Seismic Guidelines for Water Pipelines[M], ASCE, 2005.
- [17] O'ROURKE M J, VARGAS-LONDONO T. Analytical Model for Segmented Pipe Response to Tensile Ground Strain[J]. Earthquake Spectra. 2016, **32**(4): 2533-2548.
- [18] 洪华生. 工程中的概率概念[M]. 中国建筑工业出版社, 2017. (HONG Hua-sheng. [M]. Probability concepts in engineering[M]. China Building Industry Press, 2017. (in Chinese))
- [19] SINGHAL A C., BENAVIDES J C. Axial and bending

- behavior of buried pipeline joints [A]. Proceedings of the Fourth National Congress on Pressure Vessel and Piping Technology, American Society of Mechanical Engineers [C]. 1983.
- [20] 刘为民, 孙绍平. 管道接口的抗震试验研究[C]//第五届全国地震工程会议, 北京: 第五届全国地震工程会议论文集, 1998: 970-975. (LIU Wei-min, SUN Shao-ping. Shaking table test of pipe with junctions[C]// Proceeding of Fifth China Symposia on Earthquake Engineering, Beijing: Proceedings of 5CSEE, 1998: 970-975. (in Chinese))
- [21] 周静海, 赵海艳, 魏立群. 球墨铸铁供水管线在地震作用下功能性实验分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版). 2008, 24(02): 196-199. (ZHOU Jing-hai, ZHAO Hai-yan, WEI Li-qun. Experimental research on functionality of ductile cast iron pipelines under the earthquake[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science). 2008, 24(02): 196-199. (in Chinese))
- [22] 刘威, 黄鹭娜, 李杰. 供水管线渗漏试验研究[J]. 地震工程与工程振动. 2011, 31(04): 167-173. (LIU Wei, HUANG Lu-na, LI Jie. Experimentation on leakage of water pipelines[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2011, 31(04): 167-173. (in Chinese))
- [23] 傅俊. 供水管线接口变形试验与抗震可靠度研究[D]. 上海: 同济大学, 2013. (FU Jun. Displacement experiment and seismic reliability study of water supply pipeline joint[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.(in Chinese))
- [24] WHAM B, PARKER, et al. Jointed Pipeline Response to Large Ground Deformation[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2016, 7(1): 4015001-4015009.
- [25] 王颂翔. 承插式给水管道安全评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015. (WANG Song-xiang. Study on safety evaluation of water supply pipelines with the socket and spigot joint[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [26] 李冠潮. 管道柔性接口轴向力学性能及功能性试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020. (LI Guan-chao. Experimental study on the axial mechanical properties and functional properties of flexible joints in pipelines[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology. (in Chinese))
- [27] 李晓晓, 钟紫蓝, 侯本伟, 等. 大型球墨铸铁管承插式接口力学性能研究[J]. 特种结构. 2020, 37(04): 47-55. (LI Xiao-xiao, ZHONG Zi-lan, HOU Ben-wei, study on mechanical behaviors of push-on joints of large-diameter ductile iron pipelines[J]. Special Structures. 2020, 37(04): 47-55. (in Chinese))
- [28] 钟紫蓝, 王书锐, 杜修力, 等. 管道承插式接口轴向力学性能试验研究与数值模拟[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 224-230. (ZHONG Zi-lan, WANG Shu-rui, DU Xiu-li, et al. Experimental and numerical study on axial mechanical properties of pipeline under pseudo-static loading[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 224-230. (in Chinese))
- [29] 球墨铸铁给排水管道工程施工及验收规范技术要求: ZXB/T 0202-2013[S]. 2013. (The code for construction and acceptance of water and sewerage ductile iron pipeline works Specification requirement: ZXB/T 0202-2013 [S]. 2013. (in Chinese))
- [30] ISO 4633-2015, Rubber seals - Joint rings for water[S]. 2015.
- [31] 范重, 张康伟, 张郁山, 等. 视波速确定方法与行波效应研究[J]. 工程力学. 2021, 38(06): 47-61. (FAN Zhong, ZHANG Kang-wei, ZHANG Yu-shan, et al. Study on apparent wave velocity calculation method and on travelling wave effect[J]. Engineering Mechanics. 2021, 38(06): 47-61. (in Chinese))